

# Ökologische Nachhaltigkeit deutscher Ackerbaubetriebe



Wissenschaftliche Studie im Auftrag der VLI  
erstellt vom

Privaten Institut für Nachhaltige Landwirtschaft (INL), Halle (Saale)

Gefördert durch den Förderungsfonds der Rentenbank

Halle, Ochsenfurt im Oktober 2016

# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>ii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>iv</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Planung der Nachhaltigkeitsanalyse</b> .....	<b>6</b>
<b>3 Modell REPRO</b> .....	<b>7</b>
<b>4 Beschreibung der Nachhaltigkeitsindikatoren</b> .....	<b>9</b>
4.1 Stickstoffbilanzierung.....	10
4.1.1 N-Eintrag .....	11
4.1.2 Änderung der Boden -N Vorräte .....	12
4.1.3 N-Entzug .....	12
4.2 Phosphorbilanzierung.....	13
4.3 Humusbilanzierung .....	15
4.4 Pflanzenschutzintensität .....	17
4.5 Energiebilanzierung.....	19
4.6 Treibhausgasbilanzierung .....	21
4.7 Bodenschadverdichtung .....	23
4.8 Bodenerosion durch Wasser .....	24
4.9 Biodiversität .....	25
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>28</b>
5.1 Betriebsstrukturen des durchschnittlichen Projektbetriebes .....	28
5.2 Ergebnisse der Einzelindikatoren – Durchschnittlicher Projektbetrieb.....	29
5.2.1 Nährstoff- und Humusbilanzen .....	29
5.2.2 Pflanzenschutzintensität .....	31
5.2.3 Energie- und Treibhausgasbilanz .....	32
5.2.4 Bodenschadverdichtung und Erosion durch Wasser .....	33
5.2.5 Biodiversität .....	34
5.3 Regionale Betriebsstrukturen .....	35
5.4 Ergebnisse der Einzelindikatoren - Regionen.....	36
5.4.1 Nährstoff- und Humusbilanzen .....	36
5.4.2 Pflanzenschutzintensität .....	39
5.4.3 Energie- und Treibhausgasbilanz .....	41
5.4.4 Bodenschadverdichtung und Erosion durch Wasser .....	42
5.4.5 Biodiversitätspotenzial .....	44
<b>6 Bewertung der Ergebnisse</b> .....	<b>45</b>
6.1 Stickstoffbilanz .....	46
6.2 Phosphorbilanz.....	47
6.3 Humusbilanz.....	48
6.4 Pflanzenschutzintensität .....	49
6.5 Energieintensität .....	50
6.6 Treibhausgasbilanzierung .....	51
6.7 Bodenschadverdichtung .....	52
6.8 Bodenerosion .....	53
6.9 Biodiversität .....	54
6.10 Zusammenfassende Bewertung .....	55
<b>7 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>56</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der 32 Projektbetriebe in den Regionen .....	6
Abbildung 2: Struktur des Modells REPRO (HÜLSBERGEN 2003) .....	7
Abbildung 3: N-Flächenbilanzüberschuss 1990 bis 2013 in $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (BMEL 2015b).....	10
Abbildung 4: Berücksichtigte N-Flüsse zur Berechnung des flächenbezogenen N-Saldos .....	11
Abbildung 5: Berechnung der Energiebilanz anhand des direkten und indirekten Energieeinsatzes (Darstellung nach Hülsbergen 2003).....	19
Abbildung 6: Erweiterter N-Saldo in $\text{kg N ha}^{-1}$ (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe) .....	30
Abbildung 7: Bodenabtrag in $\text{t ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe) .....	33
Abbildung 8: Darstellung des Zusammenhanges zwischen Humusbruttobedarf in $\text{kg C ha}^{-1}$ und Ertrag in $\text{GE ha}^{-1}$ .....	38
Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Nährstoffentzug in $\text{kg N ha}^{-1}$ und dem Energieeinsatz von Pflanzenschutzmitteln in $\text{GJ ha}^{-1}$ für die Projektregion Nord .....	40
Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Nährstoffentzug in $\text{kg N ha}^{-1}$ und dem Energieeinsatz von Pflanzenschutzmitteln in $\text{GJ ha}^{-1}$ für die Projektregionen Ost, Süd, West .....	40
Abbildung 11: Grafischer Darstellung des Bodenabtrages in $\text{t ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ eines Projektbetriebes.....	43
Abbildung 12: Bewertungsfunktion Stickstoffsaldo .....	46
Abbildung 13: Bewertung der betrieblichen Stickstoffsalden (32 Projektbetriebe).....	46
Abbildung 14: Bewertungsfunktion Phosphorsaldo .....	47
Abbildung 15: Bewertung der betrieblichen Phosphorsalden .....	47
Abbildung 16: Bewertungsfunktion Humussaldo .....	48
Abbildung 17: Bewertung der betrieblichen Humusbilanzen .....	48
Abbildung 18: Bewertungsfunktion Behandlungsindex.....	49
Abbildung 19: Bewertung der betrieblichen Behandlungsindices .....	49
Abbildung 20: Bewertungsfunktion Energie-intensität .....	50
Abbildung 21: Bewertung der betrieblichen Energieintensitäten .....	50
Abbildung 22: Bewertungsfunktion Treibhaus-gaspotential.....	51
Abbildung 23: Bewertung der betrieblichen Treibhausgasemissionen .....	51
Abbildung 24: Bewertungsfunktion Bodenschadverdichtung.....	52
Abbildung 25: Bewertung der betrieblichen Bodenschadverdichtung.....	52
Abbildung 26: Bewertungsfunktion Bodenerosion .....	53
Abbildung 27: Bewertung der betrieblichen Bodenerosion .....	53
Abbildung 28: Bewertung des betrieblichen Biodiversitätspotentials .....	54
Abbildung 29: Übersicht über die Bewertungen aller Indikatoren .....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren und ihrer Wirkung auf verschiedene Umweltbereiche (+= enger Zusammenhang +=+ sehr enger Zusammenhang).....	9
Tabelle 2: Prozentuale Anteile der einzelnen Versorgungsstufen deutscher Ackerböden (WERNER 2006) .....	13
Tabelle 3: Prozentuale Verteilung und Entwicklung der P-Versorgung in Sachsen/Ackerböden (LfULG 2013) .....	13
Tabelle 4: Prozentuale Verteilung der P-Versorgung in Thüringen/Ackerböden (TLL 2014).....	13
Tabelle 5: Prozentuale Verteilung und Entwicklung der P-Versorgung in Hessen/Ackerböden (LLH 2014) .....	13
Tabelle 6: Energieäquivalente ausgewählter Betriebsmittel und Investitionsgüter .....	20
Tabelle 7: Indirekte Indikatoren und Wichtungsfaktoren zur Berechnung des Biodiversitätspotenzials .....	25
Tabelle 8: Flächenausstattung in ha und Viehbesatz in GV ha <sup>-1</sup> des durchschnittlichen Projektbetriebes (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe).....	28
Tabelle 9: Erweiterter N-Saldo in kg N ha <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet) .....	29
Tabelle 10: P-Saldo in kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet) .....	30
Tabelle 11: Humusbilanz (dynamisch) in kg C ha <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet) .....	31
Tabelle 12: Behandlungsindices der wichtigsten Hauptfrüchte (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe) .....	31
Tabelle 13: Energiebilanz in MJ GE <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet) .....	32
Tabelle 14: Treibhausgasbilanz in kg CO <sub>2 äq</sub> GE <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet) .....	32
Tabelle 15: Schadverdichtungsgefährdung des krumennahen Unterbodens (35 cm) als Index (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet) .....	33
Tabelle 16: Ergebnisse der 11 Teilindikatoren des Biodiversitätspotenzials (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe) .....	34
Tabelle 17: Flächenausstattung in ha und %; Viehbesatz in GV ha <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert) .....	35
Tabelle 18: Erweiterter N-Saldo in kg N ha <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet) .....	36
Tabelle 19: P-Saldo in kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet).....	37
Tabelle 20: Humusbilanz (dynamisch) in kg C ha <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet).....	38
Tabelle 21: Behandlungsindices der wichtigsten Hauptfrüchte (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen).....	39
Tabelle 22: Energiebilanz in MJ GE <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet) .....	41
Tabelle 23: Treibhausgasbilanz in kg CO <sub>2 äq</sub> GE <sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet) .....	42
Tabelle 24: Schadverdichtungsgefährdung des krumennahen Unterbodens (35 cm) als Index (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen) .....	42
Tabelle 25: Ergebnisse der 11 Teilindikatoren des Biodiversitätspotenzials (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen).....	44

## Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
AF	Ackerfläche
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
bspw.	beispielsweise
BWA	Betriebswirtschaftliche Ausrichtung
bzw.	beziehungsweise
CF	Carbon Footprint
CO	Kohlenstoffdioxid
C <sub>org</sub>	organischer Kohlenstoff
DirektZahlVerpflV	Verordnung über die Grundsätze der Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand
DGM	Digitales Geländemodell
dt	Dezitonne
äq	Äquivalente
e.V.	eingetragener Verein
FCKW	chlorierte Kohlenwasserstoffe
GE	Getreideeinheit
GfP	Gute fachliche Praxis
ggf.	gegebenenfalls
GIS	Geoinformationssystem
GJ	Gigajoule
GV ha <sup>-1</sup>	Großvieheinheiten je Hektar
GW	Grundwasser
GWP	Global Warming Potential
Häq	Humusäquivalente
ha	Hektar
HE	Humuseinheiten
HFKW/FKW	fluorierte Kohlenwasserstoffe
INL	Privates Institut für Nachhaltige Landbewirtschaftung GmbH
inkl.	inklusive
JKI	Julius Kühn-Institut Braunschweig
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
KTBL	Kuratorium für Technik, Bauwesen und Landwirtschaft
LCA	Life-cycle assessment
LF	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LfULG	Landesanstalt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen
LLH	Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen
MJ	Megajoule
N	Stickstoff
NAP	Nationaler Aktionsplan Pflanzenschutz
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NH <sub>4</sub>	Ammonium

NIR	National Inventory Report (Nationaler Inventarbericht)
N <sub>2</sub> O	Lachgas
N <sub>org</sub>	organisch gebundener Stickstoff
NO <sub>3</sub>	Nitrat
P	Phosphor
PIX	Deutscher Pflanzenschutzindex
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Diphosphorpentoxid
REPRO	Modell zur Analyse der ökologischen Nachhaltigkeit
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
THG	Treibhausgase
TM	Trockenmasse
t	Tonne
TI/vTI	Thünen-Institut
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
UBA	Umwelt Bundesamt
u.v.m.	und viele mehr
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
vgl.	vergleiche
VS	Versorgungsstufe
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WF	Wichtungsfaktoren
VLI	Verbindungsstelle Landwirtschaft-Industrie e.V.
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

# Zusammenfassung

In den letzten Jahren ist Nachhaltigkeit in allen gesellschaftlichen Bereichen zu einem relevanten Thema geworden. Vor allem die Landwirtschaft ist als ein Nutzer von endlichen Ressourcen und Bewirtschafter der Nutzflächen in diesem Land besonders gefordert, Leistungen im Sinne der Nachhaltigkeit aufzuzeigen. Um die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion einzelner Betriebe unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten bewerten zu können, wurde von der Verbindungsstelle Landwirtschaft-Industrie e.V. (VLI) das Projekt zur „Analyse der ökologischen Nachhaltigkeit deutscher Ackerbaubetriebe“ im Jahr 2014 initiiert. Das Ziel dieses Projektes war es, landwirtschaftliche Betriebe bezüglich der Umweltwirkungen der Rohstoffproduktion zu analysieren. Zu diesem Zweck wurden innerhalb von vier Regionen (Nord, Ost, Süd, West) insgesamt 32 landwirtschaftliche Betriebe hinsichtlich ihrer tatsächlichen Bewirtschaftung analysiert. Zur Erstellung eines transparenten Nachhaltigkeitsprofils wurden neun Agrarumweltindikatoren berechnet und anschließend bewertet. Die Berechnung dieser, ist mit Hilfe des Modells REPRO durch das Private Institut für Nachhaltige Landbewirtschaftung GmbH Halle/Saale (INL) erfolgt.

Im ersten Abschnitt des Projektes wurden zunächst statistische Daten hinsichtlich der bundeslandspezifischen Betriebsstrukturen recherchiert, um die vorgesehenen Projektregionen Nord, Ost, Süd und West fundiert aggregieren zu können. Im Anschluss sind die regionalen Projektbetriebe auf Grundlage definierter Auswahlkriterien (Haupterwerb, konventionell wirtschaftend, gute Datenhaltung) akquiriert worden. Da die Teilnahme freiwillig war, sind unter Umständen Hot-Spot-Regionen unterrepräsentiert.

Nach Erhebung von Bewirtschaftungsdaten über drei komplette Anbaujahre konnten einzelbetrieblich folgende Agrarumweltindikatoren berechnet und anschließend bewertet werden:

- erweiterter Stickstoffsaldo in  $\text{kg N ha}^{-1}$ ,
- korrigierter Phosphorsaldo in  $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ,
- dynamische Humusbilanz in  $\text{kg C ha}^{-1}$ ,
- Pflanzenschutzintensität als Behandlungsindex,
- Energiebilanz in  $\text{MJ GE}^{-1}$ ,
- Erosion durch Wasser in  $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ,
- Bodenschadverdichtung als Belastungsindex
- und Biodiversität bestehend aus 11 Teilindikatoren.

Anschließend wurden die Ergebnisse einerseits für die definierten Regionen, andererseits als Gesamtergebnis für den Durchschnitt der Projektbetriebe im Hinblick auf den jeweils berechneten Indikator aggregiert. Um eine Aussage über die Nachhaltigkeit der Produktion treffen zu können, wurden zum Abschluss der Arbeit die Indikatorergebnisse bewertet. Zu diesem Zweck wurden die betrieblichen Ist-Werte mit Hilfe von Bewertungsfunktionen in Werte zwischen 0 und 1 überführt. In dieser Systematik steht die 1 für einen optimalen und die 0 für einen nicht tolerablen Zustand. Als Schwelle zu einer nachhaltigen Bewirtschaftung wurde 0,75 festgelegt. Dies bedeutet, alle Ergebnisse ab 0,75 und größer sind somit als nachhaltig zu betrachten.

Dieses Vorgehen erfolgte separat für jeden Indikator, wobei die verwendeten Bewertungsfunktionen wissenschaftlich fundiert und gesellschaftlich diskutiert sind.

Im letzten Arbeitsschritt wurden die bewerteten Indikatorergebnisse zu einem einzelnen Wert verdichtet, um das Nachhaltigkeitsprofil der Projektbetriebe abbilden zu können.

### Stickstoff

Die erweiterte Stickstoffbilanz saldiert alle Stickstoffmengen, die dem (Teil-)Schlag zu- bzw. abgeführt werden. Dabei werden neben den N-Mengen aus der Düngung auch N-Immissionen aus der Luft, wie auch die symbiotische Stickstofffixierung berücksichtigt. Der Stickstoffsaldo ermöglicht es, zum einen Aussagen über die Stickstoffversorgung der Flächen, zum anderen über auftretende Verlustpotenziale und damit potentielle Umweltwirkungen treffen zu können. Für den *Durchschnitt der Projektbetriebe* ist ein Saldo von  $71 \text{ kg N ha}^{-1}$  ermittelt worden. Im Vergleich der Regionen ergibt sich für die Region Nord ein N-Saldo von  $92 \text{ kg N ha}^{-1}$ , für die Region Ost beträgt der N-Saldo  $63 \text{ kg N ha}^{-1}$ , für die Region Süd  $64 \text{ kg N ha}^{-1}$  und für die Region West liegt dieser bei  $59 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Unter Zuhilfenahme einer Bewertungsfunktion wird für die *Gesamtheit der Betriebe* eine Bewertung hinsichtlich des N-Saldos von  $0,78$  erreicht. Die hier vorliegenden Ergebnisse beziehen sich explizit auf die Projektbetriebe, so dass bekannte Problemregionen nicht abgeleitet werden können.

### Phosphor

Die Nährstoffbilanzierung für Phosphor erfolgt ebenfalls (teil-)schlagbezogen. Nach Berechnung des P-Saldos erfolgt zusätzlich eine Korrektur um die schlagspezifischen Bodengehaltsklassen (Versorgungsstufen). Die Berechnung des korrigierten Phosphorsaldos ergab für den *Durchschnitt der Projektbetriebe*  $-15 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  und für die einzelnen Regionen folgende Salden: Nord  $31 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , Ost  $-29 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , Süd  $-25 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  und West  $-45 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . Die anschließende Bewertung der Salden lässt für die *Gesamtheit der Projektbetriebe* mit einer Bewertung von  $0,80$  auf eine nachhaltige Phosphorversorgung der Böden schließen.

### Humus

Die Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit allein anhand des Humusgehaltes des Bodens ist schwierig. Dies bedarf einer ganzheitlichen Betrachtung der Bewirtschaftung. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine dynamische Humusbilanzierung verwendet. Für die *Gesamtheit der Projektbetriebe* wurde ein Saldo von  $-124 \text{ kg C ha}^{-1}$  errechnet. Für die einzelnen Regionen ergeben sich folgende Salden: Nord  $-106 \text{ kg C ha}^{-1}$ , Ost  $-79 \text{ kg C ha}^{-1}$ , Süd  $-179 \text{ kg C ha}^{-1}$  und West  $-152 \text{ kg C ha}^{-1}$ . Die Bewertung des Gesamtergebnisses mit einem Wert von  $0,58$  zeigt, dass zusammengefasst *über alle Projektbetriebe* die Humusversorgung der Flächen verbesserungsfähig ist. Über einen längeren Zeitraum wird diese Bewirtschaftung zu einer Verringerung der Bodenfruchtbarkeit führen. Weiterhin ist durch geringere Humusgehalte eine Verschlechterung der Bodenstruktur wahrscheinlich, welche in Kombination mit Extremwetterereignissen zu Erosionsereignissen führen kann. Die Tragfähigkeit der Böden wird ebenfalls beeinflusst, somit können Schadverdichtungen vermehrt auftreten.

### Pflanzenschutz

Der Indikator der Pflanzenschutzintensität aggregiert verschiedene Kennzahlen zum Pflanzenschutzmitteleinsatz. Hierzu zählen die vom Landwirt steuerbare Anzahl an durchgeführten Applikationen, Teilflächenapplikationen und die Anwendungskonzentration. Ausgegeben wird der fruchtartenspezifische Behandlungsindex, der mit den Daten des Julius Kühn-Instituts aus den Neptun-Erhebungen verglichen wird. Daraufhin erfolgte die Bewertung der Indices. Im Mittel der Projektbetriebe wurde eine Bewertung von  $0,66$  erreicht, wobei die einzelbetrieblichen Ergebnisse zwischen  $0,33$  und  $0,88$  lagen. Der regionale fruchtartenspezifische Mittelwert entspricht einer Bewertung von  $0,80$ . Folglich ist es wichtig, die Betriebe unterhalb dieses Wertes auf das Prinzip des integrierten Pflanzenschutzes hinzuweisen. Zudem ließ sich schlussfolgern, dass die Pflanzenschutzstrategien der einzelnen Projektbetriebe hinsichtlich der Stickstoffausnutzung über die Ertragsbildung noch nicht optimiert sind.

## Energie

Die energetische Effizienz der Produktion wird als Energieintensität berechnet. Dabei werden die energetischen Aufwendungen (direkt und indirekt) dem realisierten Ertrag, dargestellt als Getreideeinheit, gegenübergestellt. Für die Gesamtheit der Projektbetriebe und die einzelnen Regionen sind folgende Ergebnisse errechnet worden: *Gesamtheit der Projektbetriebe*  $162 \text{ MJ GE}^{-1}$ , Nord  $165 \text{ MJ GE}^{-1}$ , Ost  $187 \text{ MJ GE}^{-1}$ , Süd  $142 \text{ MJ GE}^{-1}$  und West  $144 \text{ MJ GE}^{-1}$ . Die anschließende Bewertung für die *Gesamtheit der Betriebe* ergibt einen Wert von  $0,98$  und deutet auf eine hohe Energieeffizienz und den ressourcenschonenden Einsatz der Betriebsmittel bei den untersuchten Betrieben hin.

## Treibhausgase

In die Bilanzierung der Treibhausgase werden alle relevanten Stickstoff-, Kohlenstoff- und Energieflüsse in Abhängigkeit von Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen einbezogen. Alle klimarelevanten Emissionen werden mittels des Global Warming Potentials (GWP) in  $\text{CO}_2$ -Äquivalente umgerechnet und bilanziert. Bezogen auf die produzierte Getreideeinheit, stellen sich die Treibhausgasemissionen in  $\text{kg CO}_2$  für die Gesamtheit der Projektbetriebe und für die Regionen wie folgt dar: *Gesamtheit der Projektbetriebe*  $29 \text{ kg CO}_2 \text{ GE}^{-1}$ , Nord  $27 \text{ kg CO}_2 \text{ GE}^{-1}$ , Ost  $32 \text{ kg CO}_2 \text{ GE}^{-1}$ , Süd  $30 \text{ kg CO}_2 \text{ GE}^{-1}$  und West  $28 \text{ kg CO}_2 \text{ GE}^{-1}$ . Anhand der Bewertungsfunktion werden diese Ergebnisse für alle Betriebe (*Gesamtheit der Projektbetriebe*  $0,76$ ) als nachhaltig bewertet, wenngleich vereinzelt auch erhöhte  $\text{CO}_2$ -Emissionen entstehen können.

## Bodenschadverdichtung

Der auf Betriebsebene errechnete Belastungsindex setzt sich aus verschiedenen Einflussfaktoren zusammen. So entscheidet zunächst die Stabilität des Bodengefüges, wie auch die tagesaktuellen Bodenwasserhalte über die Befahrbarkeit und das potentielle Verdichtungsrisiko. Zudem hat der Druck, der auf den Boden bei der Überfahrt erzeugt wird, erheblichen Einfluss. Dabei spielen die Maschinengewichte, die Reifengrößen und der Reifeninnendruck eine entscheidende Rolle. Die aggregierte Verdichtungsgefährdung wird als Belastungsindex über alle Verfahrensabschnitte der Bewirtschaftung gebildet. Für den *Durchschnitt der Projektbetriebe* wurde ein Index von  $0,09$  berechnet, der sich für die einzelnen Regionen wie folgt aufgliedert: Nord  $0,10$ , Ost  $0,10$ , Süd  $0,06$  und West  $0,10$ . Die Bewertung der Ergebnisse gibt letztendlich Aufschluss über die Verdichtungsgefährdung, im *Durchschnitt der Projektbetriebe* wurde ein Wert von  $0,77$  erreicht. Dieses Ergebnis zeigt auf, dass die Verfahren ausreichend an die tatsächlichen Bodenbedingungen angepasst und daher kaum Verdichtungen zu erwarten sind.

## Erosion durch Wasser

Die Erosionsgefährdung der Flächen in einem Betrieb wurde mit Hilfe der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) als mittlerer jährlicher Bodenabtrag in  $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  errechnet. Als wesentliche Einflussfaktoren gelten die Hanglänge und -neigung der Fläche, der Bodenbedeckungsgrad, sowie standortspezifische Parameter wie tagaktuelle Niederschlagsmenge und Bodenart. Der potentielle Bodenabtrag liegt bei  $0,67 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  im *Mittel der Projektbetriebe*. Für die einzelnen Regionen beträgt der Bodenabtrag: Nord  $0,43 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , Ost  $0,56 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , Süd  $0,83 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  und West  $0,98 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Die anschließende Bewertung zeigt, dass *im Mittel alle Projektbetriebe* ( $0,98$ ) optimal vor Wassererosionen geschützt sind. Trotz der ermittelten Bewertung von  $0,98$  und des damit einhergehenden optimalen Schutzes der Flächen vor Wassererosion sind kleinräumige Erosionsereignisse (Abflussbahnen, Steillagen u.ä.) nicht auszuschließen.

## Biodiversität

Der Bewertungsansatz für die Biodiversität ist ein qualitativer Ansatz, der elf indirekte Indikatoren berücksichtigt. Im Zuge der Berechnung erfolgte keine Aufnahme von Arten auf den Flächen, sondern es wurde das Potenzial eines Betriebes in der Nutzung und im Erhalt von Biodiversität anhand der Bewirtschaftungsdaten abgeschätzt. Es wurden die drei beeinflussbaren Wirkungsbereiche Strukturen, Inputs und Maßnahmen abgebildet. Die elf unterschiedlich stark gewichteten Teilindikatoren ergeben das betriebliche

Biodiversitätspotenzial. Im *Durchschnitt der Projektbetriebe* wurde eine Bewertung von *0,64* ermittelt. Dies lässt auf partielle Defizite hinsichtlich der Biodiversitätsleistungen schließen.

Nachhaltigkeit muss als umfassendes Gesamtkonzept verstanden werden. Erst nach Abschluss der Berechnungen aller Einzelindikatoren können Aussagen über eine nachhaltige oder nicht nachhaltige Bewirtschaftung sowohl für den Durchschnitt der Projektbetriebe als auch für die einzelnen Projektregionen getroffen werden. Durch die Einbeziehung aller untersuchten Einzelindikatoren ergibt sich eine durchschnittliche *Bewertung aller Projektbetriebe* von *0,78*. Die definierte Nachhaltigkeitsschwelle von *0,75* wird nicht unterschritten, eine ökologisch nachhaltige Wirtschaftsweise kann somit attestiert werden. Dies trifft auch für die einzelnen Regionen zu, da diese mit ihren Bewertungen von *0,75* (Nord), *0,80* (Ost), *0,77* (Süd), *0,75* (West) allesamt über der Nachhaltigkeitsschwelle liegen.

# 1 Einleitung

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ ist im 21. Jahrhundert allgegenwärtig und von gesamtgesellschaftlicher Bedeutung. Nachhaltigkeit wird als Gesamtkonzept angesehen, dass sowohl ökologische als auch ökonomische und soziale Grundgedanken vereint, die das Leitbild prägen. Auch im landwirtschaftlichen Sektor gilt es, die Betrachtung der Nachhaltigkeit als elementaren Baustein einer transparenten Wirtschaftsweise einzu beziehen. In der gesellschaftlichen Wahrnehmung gehen von der Landbewirtschaftung relevante Umweltwirkungen aus. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, diese Wirkungen anhand anerkannter, transparenter Methoden zu erfassen, zu analysieren und anschließend auch zu bewerten. Es stellt sich damit zum einen die Frage, wie sich Nachhaltigkeit messen und bewerten lässt, zum anderen, welche Daten der Produktion dafür benötigt werden bzw. zur Verfügung stehen.

Um exemplarisch die Nachhaltigkeit der deutschen Landwirtschaft abzubilden, hat die Verbindungsstelle Landwirtschaft-Industrie e.V. (VLI) das vorliegende Projekt initiiert. Ziel des Projektes war es, charakteristische Landwirtschaftsbetriebe in vier unterschiedlichen Regionen (Nord, Süd, Ost, West) bezüglich der Umweltwirkungen der landwirtschaftlichen Produktion, insbesondere des Pflanzenbaus zu analysieren. In einigen Betrieben im Projekt werden auch tierische Produkte produziert, aber in den 32 Betrieben ist die Tierhaltung eher unterdurchschnittlich ausgeprägt. Weiterführende Untersuchungen von Hot-Spot-Regionen der Tierhaltung hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit sollten durchgeführt werden.

Der Analysezeitraum beträgt drei Anbaujahre.

Für die Auswahl der Betriebe wurden im Vorfeld statistische Daten ausgewertet, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der landwirtschaftlichen Regionen zu erhalten. Die betrachteten Parameter betrafen die Betriebsgröße, den Umfang der angebauten Kulturen, die regionalspezifischen Erträge sowie, wenn praktiziert, die Tierhaltung. Denn neben den bodenklimatischen Gegebenheiten der Naturräume haben diese Parameter ebenfalls einen großen Einfluss auf das Nachhaltigkeitsprofil der landwirtschaftlichen Betriebe.

Mit Hilfe des Modells REPRO wurden die zur Verfügung gestellten Bewirtschaftungsdaten der Projektbetriebe verarbeitet und anhand von relevanten ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren ausgewertet. So erlauben die einzelbetrieblichen Auswertungen festgesetzter Umweltindikatoren sowohl einen Vergleich der Landwirtschaftsbetriebe innerhalb einer Region als auch zwischen den Regionen.

Abschließend kann anhand der mittleren Ergebnisse aller Projektbetriebe eine Aussage zur Nachhaltigkeitsleistung der deutschen Landwirtschaft im Ackerbau getroffen werden.

## 2 Planung der Nachhaltigkeitsanalyse

Um eine wissenschaftliche Basis für die Nachhaltigkeitsanalyse zu schaffen, erfolgte zunächst eine Recherche statistischer Daten hinsichtlich der bundeslandspezifischen Betriebsstrukturen mit dem Ziel, vier Modellregionen zu bilden. Dafür wurde die Internetplattform des Statistischen Bundesamtes DESTATIS genutzt. Für die anschließende Aggregation der Bundesländer (ohne Stadtstaaten) sind Kennzahlen zur Anbaustruktur und dem Viehbesatz herangezogen worden. So werden die Regionen durch folgende Bundesländer repräsentiert:

- Nord: Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen
- Ost: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen
- Süd: Bayern, Baden-Württemberg
- West: Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland

Nach der Vorauswahl der einzelnen Modellregionen erfolgte die Akquise der 32 Projektbetriebe, die jeweils mit acht Betrieben pro Region die dort vorhandenen Betriebsstrukturen repräsentieren. Aufgrund des Projektrahmens sind folgende Auswahlkriterien für eine Teilnahme am Projekt festgesetzt worden:

- Haupterwerbsbetrieb
- Konventionelle Bewirtschaftung
- Keine spezialisierten Dauerkultur- und Gartenbaubetriebe
- Gute Datenhaltung und –qualität in den Landwirtschaftsbetrieben (rückwirkend für drei Jahre ab 2014)

In die Akquise sind sowohl Ministerien und Landesämter bzw. Landwirtschaftskammern als auch der Deutsche Bauernverband und Landesbauernverbände einbezogen worden. Schlussendlich bestand der Betriebspool aus rund 50 potenziellen Praxisbetrieben, deutschlandweit verteilt, die neben der freiwilligen Teilnahme auch über die nötigen Voraussetzungen hinsichtlich der Bewirtschaftungsdaten verfügten.

Basierend auf den statistischen Daten und fachlichen Erörterungen erfolgte die Auswahl der 32 Betriebe aus diesem umfassenden Betriebspool.

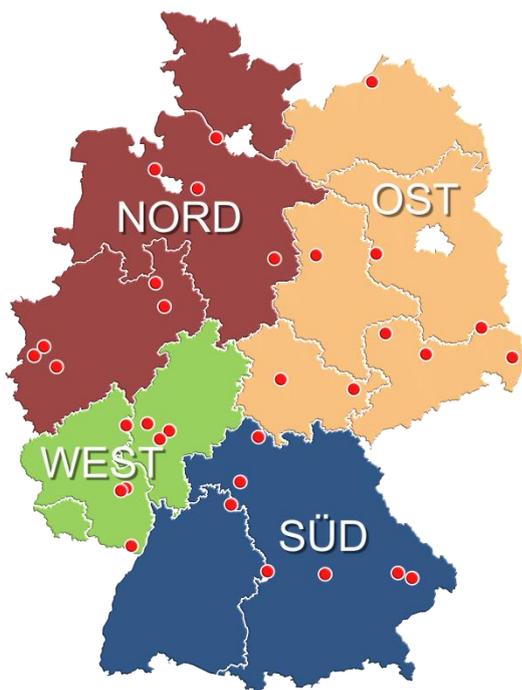


Abbildung 1: Verteilung der 32 Projektbetriebe in den Regionen

## 3 Modell REPRO

Das Modell REPRO ist ein für die wissenschaftliche und praktische Anwendung konzipiertes, computergestütztes Bilanzierungsmodell. Es ermöglicht die komplexe Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Betriebssysteme mittels nachvollziehbarer Methoden und aussagekräftiger Indikatoren (HÜLSBERGEN und DIEPENBROCK 1997; HÜLSBERGEN 2003). Die vernetzte Beschreibung der Stoff- und Energieflüsse, sowie die Darstellung der daraus resultierenden Umweltwirkungen sind dabei die zentrale Idee des Modell REPRO. Über den Stoffkreislauf Boden-Pflanze-Tier-Boden sind alle Betriebszweige miteinander verbunden (Abbildung 2). Landwirtschaftliche Betriebe werden im Modell REPRO als Gesamtsystem abgebildet, indem einzelne Teilbereiche des Betriebs (Standort, Pflanzenbau, Tierhaltung) als Subsysteme definiert und untereinander verknüpft werden. Die komplette Dokumentation der betrieblichen Produktionsprozesse, detaillierte Standortdaten sowie modellinterne Stammdaten bilden die Grundlage aller Auswertungen. Mit Hilfe dieser Daten ist eine flexible Anpassung des Modells an die realen Bewirtschaftungsbedingungen in unterschiedlichen Menüpunkten möglich.

Abbildung 2 verdeutlicht die Struktur des Modells REPRO (HÜLSBERGEN 2003).

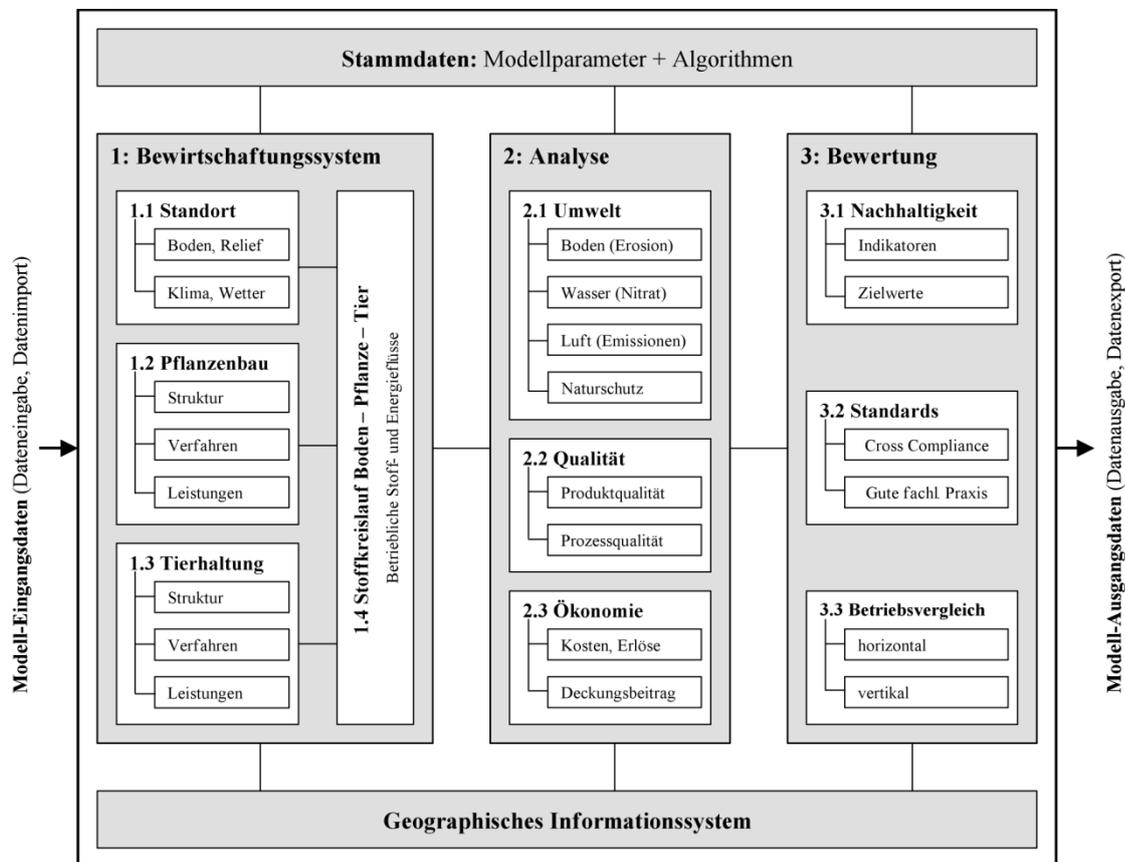


Abbildung 2: Struktur des Modells REPRO (HÜLSBERGEN 2003)

Die klare räumliche Hierarchie im Modell REPRO stellt sicher, dass in sich schlüssige Betriebssysteme entstehen. Die wesentlichen landwirtschaftlichen Aktivitäten werden auf der entsprechenden Ebene erfasst. So sind im Pflanzenbau Schlag und Teilschlag die kleinsten Untersuchungsebenen, in der Tierhaltung Stallbereich und Herde. Bewirtschaftungsdaten können je nach Fragestellung modellintern auf höherer Betrachtungsebene, z.B. auf Schlag-, Fruchtart-, Produkt-, Fruchtfolge- und Betriebsebene aggregiert werden.

Die Kopplung der Module gewährleistet, dass alle Auswertungen korrespondieren, da auf den gleichen Datenpool zugegriffen wird.

Aus Abbildung 2 gehen drei wichtige Arbeitsbereiche hervor. Allen Bereichen sind die Stammdaten übergeordnet in denen Modellparameter, Algorithmen und Grunddaten (z.B. Zusammensetzung von Düngern, Wirkstoffe von Pflanzenschutzmitteln etc.) hinterlegt sind. Diese Daten sind erweiterbar und können durch autorisierte Nutzer editiert werden.

Im **Arbeitsbereich 1-Bewirtschaftungssystem** sind die wesentlichen Informationen eines Betriebes abgelegt. Hier werden die Struktur, Bewirtschaftungsmaßnahmen und -intensitäten sowie die Standortdaten verwaltet. Es ist die zentrale Modellkomponente auf der alle weiteren Analysen basieren. Zur Vereinfachung der Dateneingabe ist das Programm zusätzlich mit Funktionen zum Datenaustausch ausgestattet. Der Teilarbeitsbereich 1.1-Standort enthält eine Schlagverwaltung mit Schnittstellen zu GIS und grafischen Darstellungsfunktionen. Informationen zum Boden, der Größe und der Hofentfernung der Schläge werden (teil)schlag- und jahresbezogen erfasst. Standortdaten sind für nahezu alle Modellberechnungen erforderlich; jedoch benötigen einzelne Module spezifische Eingangsdaten.

Die kleinste Untersuchungsebene im Pflanzenbau (Arbeitsbereich 1.2.) ist der Teilschlag, die darauf angebaute Fruchtart und Sorte bzw. die erzeugten Produkte. Für die Tierhaltung (Arbeitsbereich 1.3) sind es die Stallbereiche bzw. Herden. Daten zur Tierhaltung werden nach Tierarten und Produktionsrichtungen, Altersklassen und Leistungsgruppen differenziert erfasst und verwaltet. Der Futterbedarf wird leistungsabhängig entsprechend der Weide- bzw. Stallhaltung berechnet. In Abhängigkeit von der Fütterung werden Anfallmenge und Inhaltsstoffe der organischen Wirtschaftsdünger berechnet. Die Nährstoffverluste werden anhand des Stallsystems (Fest-, Flüssigmist) und des Düngemanagements bestimmt. Unter dem Menüpunkt 1.4 – Stoffkreislauf Boden-Pflanze-Tier können die Stoffkreisläufe auf verschiedenen Ebenen aggregiert (Betrieb, Fruchtart, Schlag u.a.) und bilanziert werden. Derzeit sind die Analysen für die Hauptnährstoffe (N, P, K), Trockenmasse, Getreideeinheiten sowie Kohlenstoff durchführbar.

Aufbauend auf den erfassten Informationen werden im **Arbeitsbereich 2** die vom Betrieb ausgehenden Wirkungen auf die abiotische und biotische Umwelt analysiert und Aussagen zur Ökonomie und zur Qualität erzeugter Produkte getroffen. Im Bereich der Umweltwirkungen kommen dazu verschiedene Methoden und Indikatoren zur Anwendung.

Im **Arbeitsbereich 3** erfolgt die Gesamtbewertung des Betriebes. Dazu ist es erforderlich, die auf unterschiedliche Art ermittelten und in verschiedenen Maßeinheiten angegebenen Indikatoren vergleichend zu betrachten. Dazu finden so genannte Bewertungsfunktionen Verwendung. Diese gestatten die Überführung der Indikatorenwerte mit unterschiedlichen Maßeinheiten in dimensionslose Werte zwischen 0 und 1. Der normalisierte Wert 0 ist die ungünstigste und 1 die günstigste Situation (=nachhaltige Bewirtschaftung). Die Indikatoren können anschließend gewichtet und zu einem Gesamtindex zusammengefasst werden. Die Vorteile dieses Verfahrens bestehen darin, dass unterschiedliche Kennzahlen grundsätzlich aggregierbar sind, eine hohe Transparenz der Bewertung sichergestellt wird und sich die Bewertungsergebnisse als Netzdiagramm anzeigen lassen. Darüber hinaus sind Betriebsvergleiche sowie die zeitliche Betrachtung der betrieblichen Entwicklung als Auswertungsmöglichkeiten gegeben Gleichwohl entbindet diese Vorgehensweise nicht von einer inhaltlich, logischen Überprüfung hinsichtlich der verschiedenen Interaktionen zwischen den verschiedenen Einzelindikatoren.

#### *DLG-Nachhaltigkeitszertifikat*

Die Analyse der ökologischen Nachhaltigkeit mit Hilfe des Modells REPRO findet bereits seit 2009 Anwendung im Zertifizierungsprozess des DLG-Nachhaltigkeitszertifikates. Die enge Zusammenarbeit verschiedener wissenschaftlicher Institutionen und die finanzielle Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) ermöglichte die Entwicklung dieses Prozesses. Neben der ökologischen Säule wird auch die ökonomische und soziale Säule der Nachhaltigkeit umfassend analysiert. Für den Erhalt des Zertifikates werden drei Bewirtschaftungsjahre betrachtet, um Einzeljahreseffekte auf Grund von spezifischen Witterungskonstellationen zu relativieren.

## 4 Beschreibung der Nachhaltigkeitsindikatoren

Die Projektbetriebe der jeweiligen Regionen wurden mit dem Modell REPRO analysiert und bewertet. Innerhalb der Analyse wurden neun Umweltindikatoren betrachtet, die wesentlichen Einfluss auf verschiedene Umweltbereiche haben. Dieser Zusammenhang spiegelt sich in Tabelle 1 wider.

**Tabelle 1: Übersicht der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren und ihrer Wirkung auf verschiedene Umweltbereiche (+= enger Zusammenhang ++= sehr enger Zusammenhang)**

Indikator	Umweltbereich				
	Ressourcen	Boden	Wasser	Luft	Biodiversität
Stickstoffsaldo		+	++	++	+
Korrigierter Phosphor-Saldo	++	++	++		+
Humusbilanz		++	+	+	
Pflanzenschutzintensität			+		++
Energieintensität	++			+	
Emission von Treibhausgasen				++	
Bodenerosion durch Wasser		++	+		
Bodenschadverdichtung		++			
Biodiversitätspotenzial		+			++

Die Berechnung der Einzelindikatoren erfolgte anhand der Bewirtschaftungsdaten der letzten drei Jahre. So können jährliche Schwankungen (bspw. im Nährstoffmanagement; Wetterereignisse) und Ungenauigkeiten ausgeglichen werden.

## 4.1 Stickstoffbilanzierung

Die ausreichende Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff ist eine wesentliche Voraussetzung zum Erzielen hoher Erträge bei guter Qualität. Darüber hinaus wirkt Stickstoff wie kein anderer Nährstoff auf diverse Umweltbereiche ein. Im globalen Maßstab wird die Eutrophierung neben dem Verlust an Biodiversität und der Klimaveränderung daher als wesentliches Umweltproblem angesehen (ROCKSTRÖM et al. 2009, STEFFEN et al. 2015).

Aufgrund seiner hohen Reaktivität ist Stickstoff an zahlreichen Umwandlungsprozessen im Boden beteiligt. Diese Prozesse werden maßgeblich durch die landwirtschaftliche Nutzung der Böden beeinflusst, insbesondere durch mineralische und organische Düngung. Ob diese Düngungsmaßnahmen negativ auf angrenzende Umweltbereiche wirken, ist abhängig von der angebauten Fruchtart, deren Düngungsintensität und dem spezifischen N-Entzug über den Ertrag. Um die Verlustpfade innerhalb des Bewirtschaftungssystems so gering wie möglich zu halten, sind landwirtschaftliche Betriebe verpflichtet, nach guter fachlicher Praxis (GfP) zu düngen und den Stickstoffüberschuss im dreijährigen Mittel pro Hektar auf maximal 60 kg ha<sup>-1</sup> zu begrenzen (§6 DüV 2006).

In Abbildung 3 sind die N-Flächenbilanzüberschüsse der letzten 23 Jahre für die Bundesrepublik abgebildet, wonach der aktuelle Überschuss (2013) auf rund 63 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> beziffert wird (BMEL 2015b).

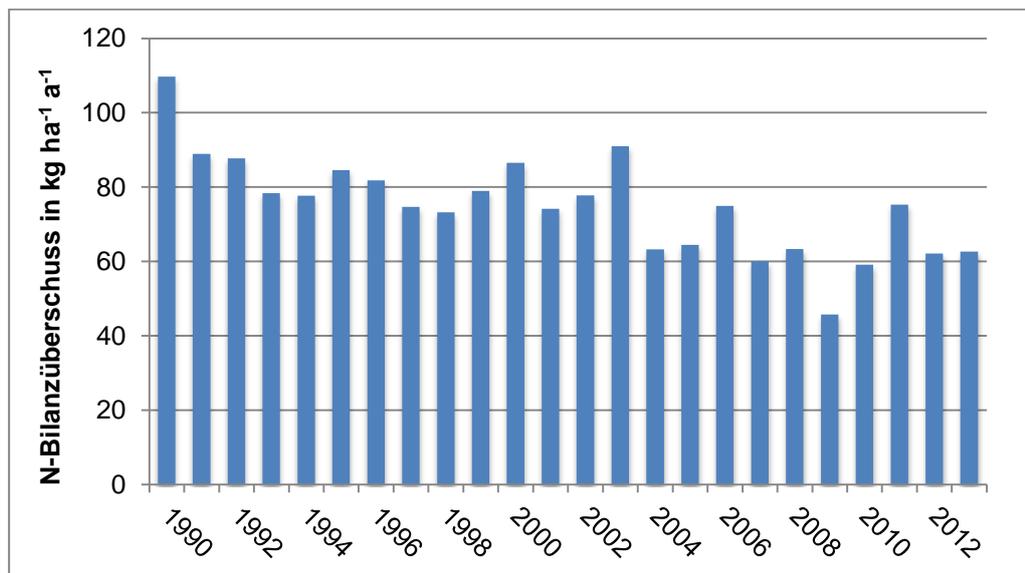


Abbildung 3: N-Flächenbilanzüberschuss 1990 bis 2013 in kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (BMEL 2015b)

Zur Analyse des Stickstoffhaushaltes werden im Modell REPRO verschiedene Methoden und Indikatoren auf unterschiedlichen Systemebenen kombiniert. Ziel ist es, in sich schlüssige betriebliche Stickstoffkreisläufe zu beschreiben. Dabei werden N-Salden, N-Verwertungsraten und N-Verlustpfade flächenspezifisch ermittelt, um Systemschwachstellen und Belastungspotenziale ausweisen zu können.

### *Hoftorbilanz*

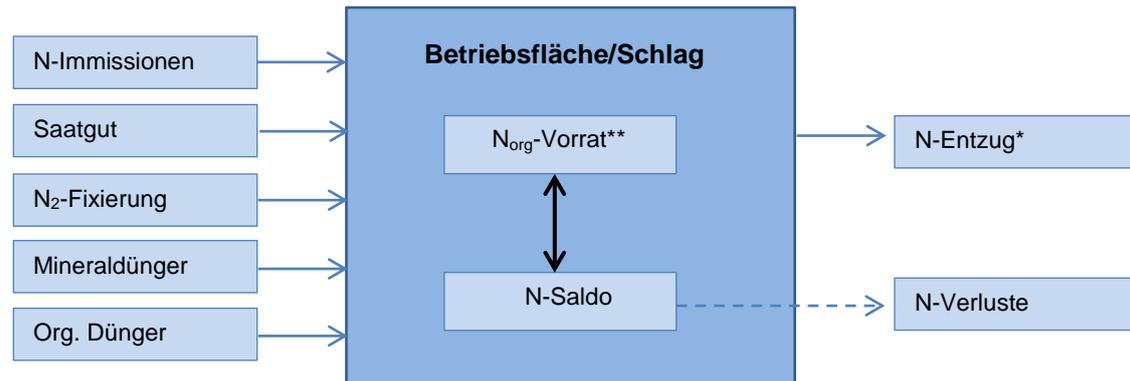
In der Hoftorbilanz werden die einzelnen N-Zufuhren aus den Zukaufsprodukten und den N-Ausfuhren über die Verkaufsprodukte, die über das Hoftor gehen, saldiert.

### *Stallbilanz*

In der Stallbilanz werden die N-Zufuhren in Futtermitteln, Stroh und Viehzukäufen der N-Bindung in tierischen Produkten, Viehverkäufen sowie NH<sub>3</sub>-Verluste, Rotte- und Lagerungsverluste gegenübergestellt.

### Erweiterte flächenbezogene N-Bilanz

In der Bodenbilanz (auch als flächenbezogene N-Bilanz bezeichnet) werden die dem Boden zugeführten und abgeführten N-Mengen saldiert. Die Bezugsfläche kann der Einzelschlag (= Schlagbilanz), eine Fruchtfolge (= Fruchtfolgebilanz) oder ein landwirtschaftlicher Betrieb (= Betriebsbilanz) sein. Die flächenbezogene N-Bilanz erlaubt Aussagen zur Dünger-N-Ausnutzung und -Effektivität sowie zur Umweltgefährdung durch N-Verluste (BIERMANN 1995). Der flächenbezogene N-Saldo beschreibt das Gesamtverlustpotenzial an reaktiven N-Verbindungen ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ) aus dem Boden. Je höher der N-Saldo, umso größer ist die Gefahr umweltrelevanter N-Emissionen in die verschiedenen Umweltbereiche (Gewässer, Atmosphäre, naturnahe Biotope). Der flächenbezogene N-Saldo (Gleichung 1) berücksichtigt die in Abbildung 4 dargestellten N-Flüsse und N-Pools.



\* N-Entzug der geernteten Haupt- und Nebenprodukte

\*\* Veränderung der Boden-N-Vorräte (Netto-Mineralisation/-Immobilisation)

**Abbildung 4: Berücksichtigte N-Flüsse zur Berechnung des flächenbezogenen N-Saldos**

Die Berechnung des N-Saldos erfolgt nach Gleichung 1.

$$S_N = N_I + N_{SYM} + N_{SG} + N_{SD} + N_{OD} + N_{MD} - \Delta N_t - N_E$$

**Gleichung 1**

Symbol	Maßeinheit	Bezeichnung
$S_N$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	N-Saldo
$N_I$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	N-Immissionen
$N_{SYM}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	Symbiotische N-Fixierung
$N_{SG}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	N-Zufuhr mit Saatgut
$N_{SD}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	N-Zufuhr mit Stroh- und Gründüngung
$N_{OD}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	N-Zufuhr mit organischen Düngern der Tierhaltung
$N_{MD}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	Mineral-N-Einsatz
$\Delta N_t$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	Änderung des Boden-N-Vorrates (Mineralisation, Immobilisation)
$N_E$	$\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$	N-Entzug

Für das bessere Verständnis dieser Art der Bilanzierung werden nachstehend die einzelnen N-Bilanzglieder beschrieben.

#### 4.1.1 N-Eintrag

##### N-Immission

Die N-Immissionen werden im Modell REPRO explizit berücksichtigt. Diese ertrags- und umweltrelevanten N-Zufuhren sind für eine möglichst genaue Bilanzierung notwendig, da ansonsten die N-Verluste um diesen Betrag unterschätzt werden würden. Die eingehenden N-Depositionswerte basieren auf einer vom

Umweltbundesamt 2002 veröffentlichten Untersuchung. Dabei konnten im Untersuchungszeitraum 1990 bis 1999 für Deutschland N-Depositionswerte zwischen 8 bis 35 kg N ha<sup>-1</sup> nachgewiesen werden. Im Rahmen des weiterführenden UBA-Forschungsprojektes PINETI (Pollutant INput and EcosysTEM Impact) können mit Hilfe aktueller Bezugsdaten aus dem Jahr 2009 im Mittel 9 bis 33 kg N ha<sup>-1</sup> als N-Immissionen angerechnet werden. In weiterführenden Literaturangaben beziffern SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2010) die durchschnittliche N-Deposition für Deutschland auf 28 kg ha<sup>-1</sup>. Aufgrund der großen Spannweite der N-Depositionen in der Literatur und in der UBA-Kartierung, wurden für die N-Immissionen in der vorliegenden Untersuchung 20 kg N ha<sup>-1</sup> veranschlagt. Diesem Term kommt in der Berechnung der Bilanzen eine besondere Bedeutung zu, da bei administrativ genutzten Methoden i.d.R. keine Berücksichtigung erfolgt.

### *Symbiotische N-Fixierung*

Im Modell REPRO wird bei der Ermittlung der symbiotischen N-Fixierung zwischen den verschiedenen fixierten N<sub>2</sub>-Mengen unterschieden, die in den Ernteprodukten enthalten sind und jenen, die gebunden in der Stroh- und Gründüngungssubstanz sowie in den Ernte- und Wurzelrückständen in den Boden gelangen. Die N<sub>2</sub>-Bindung variiert in Abhängigkeit von Witterungsfaktoren, Bodenbedingungen sowie acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen (Düngung, Saatgutimpfung, Fruchtfolge), welche die Entwicklung und Photosyntheseleistung der Leguminosenpflanzen, das Überleben der Rhizobium-Bakterien im Boden sowie die Effektivität der Symbiose beeinflussen (HÖFLICH 1986). Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren ergeben sich auch große Schwankungsbreiten in den Angaben zur Fixierungsleistung der Leguminosenarten (vgl. SCHILLING 1987, FREYER 2005).

### *Saatgut*

Das Saatgut berechnet sich im Modell REPRO aus der eingesetzten Saatgutmenge und den jeweiligen Saatgutinhaltstoffen. Die dazu notwendigen Informationen sind im Stammdatenmodul Fruchtarten sortenspezifisch aufgeführt.

### *Mineralischer Dünger*

Im konventionellen Bewirtschaftungssystem stellt der mineralische Stickstoffdünger eine entscheidende Inputgröße dar. Die Inhaltstoffe der eingesetzten mineralischen Dünger sind in den Stammdaten hinterlegt, somit wird die tatsächliche Ausbringungsmenge der Betriebe als Inputgröße verwendet.

### *Organischer Dünger*

Diese Bilanzgröße berücksichtigt die N-Zufuhren aus Stroh- und Gründüngung, die Düngung mit Mist, Gülle und Jauche sowie den N-Input durch Zufuhr sonstiger organischer Dünger, wie z.B. Vinasse oder Champost. Die einzelnen Inhaltstoffe sind wiederum im Stammdatenpool hinterlegt und basieren auf allgemein vertretenen Literaturangaben bzw. werden betriebsindividuell angepasst, wenn Analyseprotokolle von ausgetragenen organischen Düngern vorliegen.

#### **4.1.2 Änderung der Boden -N Vorräte**

Dieser Faktor erfasst die Änderung der Boden-N-Vorräte durch Netto-Mineralisation und Immobilisation unter Berücksichtigung der Humusbilanz. Damit wird die Voraussetzung für eine realistische Abschätzung der N-Verluste geschaffen (HÜLSBERGEN 2003).

#### **4.1.3 N-Entzug**

Die N-Entzüge werden jeweils für das Haupt- und Nebenprodukt ausgewiesen. Der Stickstoffentzug variiert nach der tatsächlichen Erntemenge und dem spezifischen N-Gehalt der geernteten Produkte.

## 4.2 Phosphorbilanzierung

Neben Stickstoff ist auch Phosphor ein wichtiger Hauptnährstoff, welcher das Wachstum der Pflanze bestimmt. Aufgrund wichtiger Funktionen im Stoffwechsel und stark variierenden P-Gehalten hochentwickelter Böden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1998) wird er mittlerweile auch als essentielles Element bezeichnet (vgl. FISCHINGER et al. 2014).

Laut Literaturangaben erfolgt durch die Rückführung der Ernterückstände und die Düngung eine P-Anreicherung in den Oberböden. Auch WERNER (2006) weist eine prozentuale Verteilung der Versorgungsstufen A bis E für Ackerland in Deutschland aus (Tabelle 2). Anhand dieser Werte lässt sich ableiten, dass 41 % der Ackerflächen mit Phosphor überversorgt sind und dadurch teilweise hohe bis sehr hohe Versorgungsstufen erreicht werden (vgl. BMEL 2009).

**Tabelle 2: Prozentuale Anteile der einzelnen Versorgungsstufen deutscher Ackerböden (WERNER 2006)**

	VERSORGUNGSSTUFE				
	A	B	C	D	E
2006	3	18	38	29	12

Demgegenüber stehen Praxisdaten verschiedener Bundesländer, die auf abnehmende P-Gehalte in Ackerböden verweisen. So verdeutlicht Tabelle 3, dass zwischen 1986 und 2011 eine Verschiebung der P-Versorgung sächsischer Böden von den Versorgungsstufen C hin zu B stattgefunden hat.

**Tabelle 3: Prozentuale Verteilung und Entwicklung der P-Versorgung in Sachsen/Ackerböden (LfULG 2013)**

	VERSORGUNGSSTUFE				
	A	B	C	D	E
1986-1989	3	26	33	30	8
1997-2006	8	32	30	20	9
2007-2011	10	38	30	15	7

Auch die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (2014) verweist darauf, dass 30 bis 50 % der Ackerböden im Untersuchungszeitraum 2007-2012 in den Versorgungsstufen A und B einzuordnen sind (Tabelle 4).

**Tabelle 4: Prozentuale Verteilung der P-Versorgung in Thüringen/Ackerböden (TLL 2014)**

	VERSORGUNGSSTUFE				
	A	B	C	D	E
2007-2012	13	35	25	15	12

Analysen des Landesbetriebes Landwirtschaft Hessen (2014) ergaben eine Verdopplung der Flächenanteile in der Versorgungsstufen B bei gleichzeitiger Verminderung der Anteile in Versorgungsstufen D und E (Tabelle 5).

**Tabelle 5: Prozentuale Verteilung und Entwicklung der P-Versorgung in Hessen/Ackerböden (LLH 2014)**

	VERSORGUNGSSTUFE				
	A	B	C	D	E
1998	3	11	33	36	17
2013	7	24	37	23	9

Doch nicht nur die Düngung und der Verbleib pflanzlicher organischer Masse beeinflussen die Phosphorgehalte in landwirtschaftlich genutzten Böden. Anhand von Dauerbeobachtungsversuchen (2002-2012) am Standort Trenthorst (Schleswig-Holstein) konnte auch ein wesentlicher Einfluss des Bewirtschaftungssystems (ökologisch/konventionell; Milchviehhaltung/Marktfruchtbau) nachgewiesen werden (PAULSEN et al. 2013).

Angesichts dieser Untersuchungsdaten der Landesbehörden lässt sich schließen, dass zum einen die P-Versorgung der Ackerböden regional abnimmt, zum anderen in Hot-Spot-Regionen der Tierhaltung eine Überversorgung mit Phosphor vorliegt. Aus diesen Gründen ist eine flächenspezifische Bilanzierung notwendig.

Die Darstellung des Phosphorhaushaltes erfolgt im Modell REPRO über die Eingabe teilschlagbezogener Messwerte für Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden und über die Berechnung der entsprechenden Nährstoffbilanzen. In die Berechnung des P-Saldos fließen leicht erhebbare Bewirtschaftungsdaten ein: angebaute Fruchtarten, Erträge an Haupt- und Nebenprodukten, Nährstoffentzüge, mineralische und organische Düngung (differenziert nach Düngerart und Qualitätsparametern). Abschließend erfolgt eine Korrektur anhand der schlagspezifischen Versorgungsklasse. Gleichung 2 zeigt die Berechnung der flächenbezogenen P-Bilanz.

$$S_P = P_{SG} + P_{SD} + P_{OD} + P_{MD} - P_E + \text{Korrektur}$$

**Gleichung 2**

Symbol	Maßeinheit	Bezeichnung
$S_P$	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	P-Saldo
$P_{SG}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	P-Zufuhr mit Saatgut
$P_{SD}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	P-Zufuhr mit Stroh- und Gründüngung
$P_{OD}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	P-Zufuhr mit organischen Düngern der Tierhaltung
$P_{MD}$	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	Mineral-P-Einsatz
$P_E$	$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	P-Entzug

## 4.3 Humusbilanzierung

Der Boden ist der wichtigste Produktionsfaktor im landwirtschaftlichen Bewirtschaftungssystem. Er ist eine endliche Ressource und wird nur sehr langsam neu gebildet. Durch die ackerbauliche Nutzung von aktuell 11,9 Mio. Hektar in Deutschland (AID 2015) werden hohe Anforderungen an den Bewirtschafter gestellt. Ziel soll sein, durch eine effiziente, nachhaltige und umweltverträgliche Bodennutzung, die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu erhalten (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2012). Bereits 1996 wurden diese Ziele im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) verfasst und gelten seitdem für alle Grundstückseigner und Inhaber der tatsächlichen Gewalt.

Weiterhin kommt dem Boden eine herausragende Bedeutung hinsichtlich der nationalen und internationalen Klimarahmenkonventionen zu. Demnach steht er als CO<sub>2</sub>-Senke zur Verfügung, um stabile Treibhausgasemissionen zu erreichen (BMUB 2015) und den Klimawandel zu stoppen. Im Zuge dessen wurde 2011 ein Projekt vom Thünen-Institut (TI) ins Leben gerufen, welches die Kohlenstoffvorräte in deutschen Böden anhand von 3.000 Standorten ermitteln soll. Zurzeit werden noch ausstehende Beprobungen in den südlichen bzw. östlichen Bundesländern sowie Laboranalysen durchgeführt. Erste Ergebnisse sind voraussichtlich ab 2018 verfügbar.

Nach KOLBE und ZIMMER (2016) sind bei einem Humusgehalt von 1 bis 3 % insgesamt 45 bis 135 t Humus je Hektar in der Ackerkrume (bis 30 cm) enthalten. Umgerechnet in Humus-C entspricht dies einem Gesamtkohlenstoffvorrat zwischen 26.000 und 78.000 kg C<sub>org</sub> je Hektar.

Das Prinzip der Humusbilanzierung beruht darauf, dass der fruchtartenspezifische Humusbedarf mit der Humuslieferung organischer Materialien verglichen wird. Im Modell REPRO kann dies nach vier verschiedenen Ansätzen erfolgen:

- im Standardmodus mit festen Koeffizienten nach LEITHOLD et al. (1997),
- im erweiterten Modus mit dynamischen Koeffizienten nach HÜLSBERGEN et al. (2000),
- im LUFA-Modus nach dem VDLUFA-STANDPUNKT (2004) zur Humusbilanzierung; umgerechnet in Humusäquivalente (Häq), wobei 1 Häq 1 kg C in der humifizierten organischen Masse des Bodens entspricht,
- mit den Koeffizienten im Rahmen der Cross Compliance Richtlinien (Häq).

In der vorliegenden Untersuchung erfolgte die Humusbilanzierung auf Grundlage der Humuseinheiten-(HE)-Methode nach HÜLSBERGEN et al. (2000). Abrechnungsmaßstab ist die „Humuseinheit“, die als 1 t Humus mit 50 kg N und 580 kg C definiert ist.

In die Berechnung der Humusbilanz (Gleichungen 11 bis 16) fließen verschiedene Bewirtschaftungsdaten ein: so die angebauten Fruchtarten, die Erträge von Haupt- und Nebenprodukten, die Stickstoffentzüge, die mineralische N-Düngung und die organische Düngung (differenziert nach Düngerarten und Qualitätsparametern).

$$H_{BS} = H_{BB} + H_{HM} + H_{SD} + H_{OD} \quad \text{Gleichung 3}$$

$$H_{BB} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{AF_{HZi} \cdot k_{HZi}}{AF} \right) \quad \text{Gleichung 4}$$

$$H_{HM} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{AF_{HMi} \cdot k_{HMi}}{AF} \right) \quad \text{Gleichung 5}$$

$$H_{NB} = H_{BB} + H_{HM} \quad \text{Gleichung 6}$$

$$H_{SD} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{AF_{SDi} \cdot SD_i \cdot k_{SDi}}{AF} \right) \quad \text{Gleichung 7}$$

$$H_{OD} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{AF_{ODi} \cdot OD_i \cdot k_{ODi}}{AF} \right) \quad \text{Gleichung 8}$$

Symbol	Maßeinheit	Bezeichnung
$H_{BB}$	$HE \text{ ha}^{-1} AF^{-1}$	Humusbruttobedarf
$H_{HM}$	$HE \text{ ha}^{-1} AF^{-1}$	Humusersatzleistung humusmehrender Fruchtarten
$H_{NB}$	$HE \text{ ha}^{-1} AF^{-1}$	Humusnettobedarf
$H_{SD}$	$HE \text{ ha}^{-1} AF^{-1}$	Humusersatzleistung durch Stroh- und Gründüngung
$H_{OD}$	$HE \text{ ha}^{-1} AF^{-1}$	Humusersatzleistung durch organische Dünger
$H_{BS}$	$HE \text{ ha}^{-1} AF^{-1}$	Humus-Bilanzsaldo
$AF_{HZ}$	ha	Ackerfläche mit humuszehrender Fruchtart
$AF_{HM}$	ha	Ackerfläche mit humusmehrender Fruchtart
$AF_{SD}$	ha	Ackerfläche mit Stroh- oder Gründüngung
$AF_{OD}$	ha	Ackerfläche mit organischer Düngung
$AF$	ha	Ackerfläche (gesamt)
$SD$	$dt \text{ FM ha}^{-1}$	je Flächeneinheit eingesetzte Menge an Stroh- und Gründüngung
$OD$	$dt \text{ FM ha}^{-1}$	je Flächeneinheit ausgebrachte Menge organischer Dünger
$k_{HZ}$	$HE \text{ ha}^{-1}$	Bilanzkoeffizient für humuszehrende Fruchtart
$k_{HM}$	$HE \text{ ha}^{-1}$	Bilanzkoeffizient für humusmehrende Fruchtart
$k_{SD}$	$HE \text{ dt}^{-1} \text{ FM}^{-1}$	Bilanzkoeffizient für Stroh- und Gründünger
$k_{OD}$	$HE \text{ dt}^{-1} \text{ FM}^{-1}$	Bilanzkoeffizient für organische Dünger

## 4.4 Pflanzenschutzintensität

Pflanzenschutz ist eine der wichtigsten Maßnahmen zur Ausschöpfung und Sicherung des Ertragspotenzials der Kulturpflanzen. So haben sich die Erträge unserer wichtigsten Kulturpflanzen seit 1950 bis heute im Durchschnitt verdreifacht und die gegenwärtigen jährlichen Ertragszuwächse liegen bei den Getreidearten zwischen ca. 0,5 und 0,9 dt ha<sup>-1</sup>. An dieser Entwicklung ist der sachgerechte Einsatz von Pflanzenschutzmitteln maßgeblich beteiligt. Neben der Absicherung des Pflanzenwachstums durch Maßnahmen des Pflanzenschutzes wurden auch die Ertragsschwankungen zwischen den Anbaujahren verringert, worauf Analysen des INL hinweisen. Im Vergleich der Befunde älterer Jahre (vor 1990) zu aktuellen Daten verminderte sich die Streuung der jährlichen Ertragsdaten bei Winterweizen von ca. 21 % auf ca. 13 % und bei Mais von etwa 40 % auf 19 % (HEYER 2013).

Die mit dem Pflanzenschutz angestrebten Effekte werden durch Maßnahmen in der Kulturlandschaft realisiert und sollen das Auftreten von Schaderregern steuern oder eine bessere Anpassung der Kulturpflanze an risikobehaftete Umweltsituationen (Kälte, Wind, Wassermangel) erreichen. Durch die Optimierung der Wachstumsbedingungen für die Kulturpflanze und die Ausschöpfung des züchterisch vorgegebenen Ertragspotenzials wirken Pflanzenschutzmaßnahmen ebenfalls auf den Nährstoffhaushalt und tragen zur effizienten Nutzung der Pflanzennährstoffe bei. Letztlich wird durch Ertragsabsicherung auch auf die CO<sub>2</sub>-Bindung der Kulturpflanze Einfluss genommen (HEYER et al. 2010).

Die vorstehend herausgestellten positiven Effekte des Pflanzenschutzes können jedoch durch eher negative Auswirkungen überlagert werden, wenn die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln unsachgemäß erfolgt oder diese nicht den Ertragserwartungen angepasst wird. Letzteres indiziert, dass sowohl ein zu geringer als auch ein zu hoher Einsatz von Pflanzenschutzmitteln negativ zu sehen ist.

Somit ist die Optimierung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes und die Vermeidung negativer Auswirkungen auf Umweltschutzgüter eine wichtige Zielsetzung im Rahmen einer Betrachtung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Produktion.

Auf Grundlage der Richtlinie 2009/128/EG wurde mit der Neuordnung des Pflanzenschutzgesetzes im Februar 2012 die Optimierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln besonders herausgestellt, indem im Abschnitt 2 des Gesetzes der administrative und fachliche Rahmen einer guten fachlichen Praxis und des integrierten Pflanzenschutzes neu aufgenommen wurde. Zur Umsetzung und Kontrolle dieser Ziele wurde ein Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln initiiert. Gleichzeitig wurden die Verantwortlichkeiten zur Umsetzung des „Nationalen Aktionsplan Pflanzenschutz (NAP)“ (BMEL 2013) festgelegt.

Neben der Erfassung der Ausgangslage in verschiedenen Bereichen (z.B. Anwenderschutz, Gewässerschutz oder Flächenproduktivität) und der Formulierung von Schwerpunktzielen (z.B. Gewässerschutz, Verbraucherschutz, Lebensmittelsicherheit sowie Naturhaushalt) enthält der Aktionsplan festgelegte Kenngrößen – die sogenannten Indikatoren. Sie dienen der regelmäßigen Überprüfung, ob die formulierten Ziele realisiert wurden. Die insgesamt 28 Indikatoren werden im Deutschen Pflanzenschutzindex (PIX) zusammengefasst. Pflanzenschutzmittel im Grundwasser (GW), SYNOPS- Risikoindex für Nicht-Zielorganismen (aquatisch und terrestrisch) oder der Anteil der Flächen/Betriebe mit ökologischer Landwirtschaft sind hier nur exemplarisch zu nennen. Diese Auswahl einzelner Beispiele zeigt, dass viele der aufgeführten Indikatoren keinen direkten Bezug zu dem im Betrieb durchgeführten Pflanzenschutz haben. Sie vermitteln keine Anhaltspunkte zur Einschätzung bzw. Optimierung des betrieblichen Pflanzenschutzes. Sie sind jedoch für die Bewertung europäischer Zielsetzungen im Zusammenhang mit der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) oder des Natura 2000–Netzwerkes von Bedeutung.

Für die Begleitung des betrieblichen Pflanzenschutzes sind aus den Rahmenvorgaben des NAP ebenfalls Indikatoren vorgesehen. So z.B. die Ertragssicherung durch Pflanzenschutz, die Flächeneffizienz und der Behandlungsindex.

Die Indikatoren Ertragssicherung und Flächeneffizienz erfassen retrospektiv die Leistungen des Pflanzenschutzes durch einen Vergleich von Produktionssystemen (bzw. Versuchsflächen) mit und ohne sichernde Pflanzenschutzmaßnahmen sowie die pro Hektar gegebenen Ertragsleistungen. Eine direkte Ertragssteigerung durch den Pflanzenschutz lässt sich auf individueller betrieblicher Basis im Regelfall nicht ableiten, weil Ertragsvergleiche mit bzw. ohne Pflanzenschutz oder der Vergleich unterschiedlicher Pflanzenschutzstrategien nicht möglich ist. Eine Bereitstellung derartiger Daten dürfte für die meisten Betriebe auch nicht möglich sein.

Im vorliegenden Projekt wurde daher auf den Behandlungsindex zurückgegriffen. Dieser Indikator hat für die Einschätzung des betrieblichen Pflanzenschutzes einige Vorteile, die folgendermaßen zu charakterisieren sind:

Der Indikator aggregiert verschiedene Kennzahlen zum Pflanzenschutzmitteleinsatz, so die Anzahl der durchgeführten Applikationen, Teilflächenapplikationen und die tatsächliche Anwendungskonzentration. Diese Kennzahlen sind vom Landwirt steuerbar und der Indikator kann für alle Fruchtarten und PSM-Gruppen nach einer einheitlichen mathematischen Vorgabe ermittelt werden (HEYER et al. 2005; HEYER und CHRISTEN 2009) (Gleichung 17). Auf dieser Ebene ist es möglich, eventuelle Schwachpunkte in der Umsetzung des Pflanzenschutzes zu erkennen. Der Indikator allein, lässt eine Bewertung noch nicht zu.

$$BI = \frac{\text{Aufwandmenge} \cdot \text{behandelte Fläche}}{\text{zugelassene Menge PSM} \cdot \text{Gesamtfläche}}$$

**Gleichung 9**



An dieser Stelle wird auf die Getreideeinheit nach WOERMANN (1944) als Maßzahl zurückgegriffen. Sie beschreibt den ernährungsphysiologischen Wert einer Produkteinheit und gewährleistet die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fruchtarten und –folgen untereinander.

**Tabelle 6: Energieäquivalente ausgewählter Betriebsmittel und Investitionsgüter**

Inputgröße			ME	Energieäquivalent	Literaturquelle
direkt	Kraftstoff	Dieseldieselkraftstoff	MJ l <sup>-1</sup>	47,8	GEMIS (2002)
indirekt	Betriebsmittel	Mineraldünger			PATYK & REINHARDT (1997)
		N (Kalkammonsalpeter)	MJ kg <sup>-1</sup>	49,1	
		P (Superphosphat)	MJ kg <sup>-1</sup>	40,5	
		K	MJ kg <sup>-1</sup>	12,7	
		Ca	MJ kg <sup>-1</sup>	3,35	
	Pflanzenschutzmittel	MJ kg <sup>-1</sup>	331,8	GEMIS (2002)	
	Saatgut			KALK et al. (1995)	
Kartoffeln	MJ kg <sup>-1</sup>	1,3			
Winterweizen	MJ kg <sup>-1</sup>	5,5			
Wintergerste	MJ kg <sup>-1</sup>	5,5			
Investitionsgüter		Zuckerrüben	MJ kg <sup>-1</sup>	98,0	
		Maschinen und Geräte	MJ kg <sup>-1</sup>	108	KTBL
		Transport innerbetrieblich	MJ t <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup>	6,3	KTBL

$$E_i = E_S + E_{MD} + E_{OD} + E_{PSM} + E_M \quad \text{Gleichung 10}$$

$$E = E_d + E_i \quad \text{Gleichung 11}$$

$$EO = EB - EB_S \quad \text{Gleichung 12}$$

$$EO_n = EO - E \quad \text{Gleichung 13}$$

$$EI = E / GE \quad \text{Gleichung 14}$$

$$OI = EO / E \quad \text{Gleichung 15}$$

Symbol	Maßeinheit	Bezeichnung
E	GJ ha <sup>-1</sup>	Energieinput
E <sub>d</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	direkter Energieeinsatz
E <sub>i</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	indirekter Energieeinsatz
E <sub>S</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für die Produktion von Saatgut
E <sub>MD</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für die Produktion von Mineraldünger
E <sub>OD</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	Energieeinsatz mit organischem Dünger, Substitutionswert
E <sub>PSM</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für die Produktion von Pflanzenschutzmitteln
E <sub>M</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für die Produktion von Maschinen
EO	GJ ha <sup>-1</sup>	Energieoutput
EB	GJ ha <sup>-1</sup>	Bruttoenergie, physikalischer Brennwert der geernteten Biomasse
EB <sub>S</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	Bruttoenergie des eingesetzten Saatguts
EO <sub>n</sub>	GJ ha <sup>-1</sup>	Netto-Energieoutput
EI	MJ GE <sup>-1</sup>	Energieintensität
GE	GJ ha <sup>-1</sup>	Getreideeinheiten-Ertrag
OI		Output/Input-Verhältnis

## 4.6 Treibhausgasbilanzierung

Mit der Unterzeichnung des Kyoto-Protokolls im Jahr 1997 hat sich die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet, ab 2005 jährlich einen „Nationalen Inventarbericht“ (NIR) zu den Quellen und Senken von Treibhausgasemissionen (THG) im Bundesgebiet zu erstellen. Die Besonderheit des Kyoto-Protokolls im Vergleich zum Klimagipfel in Rio de Janeiro 1992 ist, dass erstmals verbindliche Vereinbarungen zum Klimaschutz getroffen wurden, die für alle Vertragsstaaten gleichermaßen gelten. Zielstellung war es, die THG in Form von CO<sub>2</sub> im Vergleich zum Basisjahr 1990 um 21 % zu senken; dabei erfolgt eine Umrechnung aller klimarelevanten Gase (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FCKW, FKW, HFKW und SF<sub>6</sub>) in CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Im Jahr 2014 erfolgte eine internationale Überprüfung der Zielerfüllung der einzelnen Vertragsstaaten, wobei Deutschland sein Ziel mit 23,8 % Emissionseinsparung sogar übertroffen hat (UBA 2014a). Der Anteil der Landwirtschaft an den Gesamtemissionen beträgt laut dem aktuellen NIR 6,7 % (UBA 2014a). Als Emissionsquellen werden im NIR die Emissionen aus der fermentativen Verdauung der Wiederkäuer sowie dem Wirtschaftsdüngermanagement als auch Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden angeführt.

Jedoch ist es nicht ausreichend, die Gesamt CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. das CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial global und national für die einzelnen Sektoren zu ermitteln. Vielmehr stellt sich die Frage, wie viele CO<sub>2</sub>-Äquivalente werden für die Produktion eines Produktes benötigt, um die Effizienz von Produktionsprozessen bewerten zu können.

In der Industrie und Wirtschaft wird zurzeit die Ökobilanz (Life Cycle Assessment-LCA) angewandt.

Auf Grundlage standardisierter (nach DIN EN ISO 14040 und 14044) Methoden können Umweltaspekte und -wirkungen von Produktionssystemen analysiert werden (DUNKELBERG et al. 2011). Historischer Hintergrund für die Entwicklung der Ökobilanzierung war der steigende Verbrauch fossiler Energie und den damit einhergehenden Umweltwirkungen. Die wichtigste Teilbilanz ist dabei die Sachbilanz, welche die Input- und Outputgrößen, sprich die Stoff- und Energieströme eines Produktes (bspw. Brot, Milch), während des gesamten Lebensweges saldiert. Über die Onlinedatenbank ProBas des UBA sind Prozessdetails einzelner Produkte (inkl. der Vorkette) kostenlos abrufbar. Neben den In- und Outputs sind folgende Umweltaspekte berücksichtigt und verfügbar: Ressourcen, Luftemissionen, Gewässereinleitungen und Abfälle. Ökobilanzen können sowohl für die Definition von Grenzwerten als auch von umweltpolitischen Zielen herangezogen werden.

Neben der ganzheitlichen Betrachtung der Umweltwirkungen mit Hilfe der LCA können gezielte Aussagen zu den Treibhausgas-Emissionen durch den Carbon Footprint getroffen werden. Er ist „[...] die Summe aller THG-Emissionen, welche mit diesem Produkt in Verbindung gebracht werden.“ (OSTERBURG et al. 2009). In die Berechnung gehen alle die vom IPCC als klimarelevant eingestuft gasförmigen Stoffe ein.

Die Ausweisung des Carbon Footprints schafft Transparenz entlang der Wertschöpfungskette, dient der Sensibilisierung und zeigt Potenziale zur Optimierung der THG-Emissionen im Produktionsprozess auf (BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE E.V. 2010).

Eine weitere Methode, die sich ausschließlich auf die Klimawirksamkeit der landwirtschaftlichen Produktion bezieht, wurde von HÜLSBERGEN et al. 2001 entwickelt. Bilanziert werden die Emissionen klimarelevanter Gase innerhalb eines Betriebssystems, sodass alle relevanten Stickstoff-, Kohlenstoff- und Energieflüsse in Abhängigkeit von Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen einbezogen werden. Als wesentliche Einflussfaktoren der Bewirtschaftung wird die Betriebsstruktur (Tierbesatz, Fruchtfolge), die Bewirtschaftungsintensität (Stoff- und Energieinputs) sowie die Arbeitsverfahren (z.B. Bodenbearbeitung) berücksichtigt.

Zur Quantifizierung der THG-Emission (umgerechnet in  $\text{CO}_2_{\text{äq}}$ ) kommen folgende Ansätze zur Anwendung (Gleichung 16):

- Die THG- und Energiebilanz sind miteinander gekoppelt; berücksichtigt werden der direkte (z.B. Kraftstoff) und indirekte (z.B. Dünge- und Pflanzenschutzmittel, Investitionsgüter) Einsatz fossiler Energie und die damit verbundenen THG-Emissionen.
- Die C-Speicherung bzw. -Freisetzung im Humus wird mit der Humusbilanz (dynamischer Ansatz) ermittelt.
- Die Berechnung der  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen erfolgt unter Verwendung des IPCC-Ansatzes (IPCC 2006). Stark vereinfachend wird unterstellt, dass 1 % des den Böden durch organische und mineralische Düngung,  $\text{N}_2$ -Fixierung und N-Deposition zugeführten Stickstoffs als  $\text{N}_2\text{O}$ -N emittiert werden. Die gasförmigen  $\text{NH}_3$ -Verluste der Düngerapplikation bleiben in dieser Betrachtung unberücksichtigt.

Die  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen werden, nach IPCC, in  $\text{CO}_2$ -Äquivalente [ $\text{CO}_2_{\text{äq}}$ ] gemäß ihrem spezifischen Global Warming Potenzial (GWP) umgerechnet.

$$THG = \frac{E_i + N + \Delta C}{E_o}$$

**Gleichung 16**

Symbol	Maßeinheit	Bezeichnung
THG	$\text{kg CO}_2_{\text{äq}} \text{ GJ}^{-1}$	Treibhausgasemissionen
$E_i$	$\text{kg CO}_2_{\text{äq}} \text{ ha}^{-1}$	Energieinput
N	$\text{kg CO}_2_{\text{äq}} \text{ ha}^{-1}$	Stickstoffinput
$\Delta C$	$\text{kg CO}_2_{\text{äq}} \text{ ha}^{-1}$	$\text{CO}_2$ -Sequestrierung (Humuspool)
$E_o$	$\text{GJ ha}^{-1}$	Energieoutput

## 4.7 Bodenschadverdichtung

Für die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist insbesondere ein intaktes Bodengefüge notwendig. Es sollte somit ein integraler Bestandteil einer angepassten Bewirtschaftung sein. So sieht bereits das BBSchG aus dem Jahr 1998 vor, dass schädliche Bodenveränderungen, die zur Beeinträchtigung der Bodenfunktionen führen, abzuwehren und ggf. die Funktionsfähigkeit wiederherzustellen sind (BBSchG §1f.). Unter ackerbaulichen Gesichtspunkten kann dies zum einen durch eine angepasste Düngung und zum anderen durch eine angepasste Verfahrensgestaltung im Vegetationsverlauf erfolgen. Angepasst bedeutet in diesem Sinne an den vorherrschenden Bodenzustand und nach guter fachlichen Praxis ausgerichtet. Um in der Praxis eine Beurteilung des Bodenzustandes vornehmen zu können, eignet sich die Spatendiagnose, z.B. nach dem Schema von DIEZ (1991). Diese kann anhand der Beurteilung von visuell erfassbaren Parametern, z.B. der Form von Aggregaten unter anderem Rückschlüsse auf eine Schadverdichtung geben.

Den größten ackerbaulichen Einfluss hat dabei die Bodenbearbeitung, da mittels der Lockerung und Rückverfestigung das Bodengefüge direkt und indirekt beeinflusst wird. Im weiteren Produktionsablauf unterliegt der Boden einer ständigen mechanischen Belastung durch wiederholtes Überrollen der Fläche. Die Dimension der Belastung ist im Wesentlichen abhängig von der Maschinenausstattung im Betrieb, im Speziellen von der Bereifung, dem Reifeninnendruck, der Radlast der Maschinen sowie vom Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt der Bearbeitung als auch von der vorherrschenden Stabilität des Bodengefüges.

Im Modell REPRO wird der Indikator der „Bodenschadverdichtung“ nach RÜCKNAGEL (2007) sowie RÜCKNAGEL et al. (2015) mittels eines Belastungsindex für 20 cm und 35 cm Bodentiefe auf Betriebsebene ermittelt und als Verdichtungsrisiko ausgegeben.

Die wesentlichen Berechnungsschritte werden im Modell REPRO wie folgt durchgeführt:

- *Stabilität des Bodengefüges:*  
Zur Abschätzung der Stabilität des Bodengefüges werden Standardwerte für Trockenrohdichte und Aggregatdichte in der unteren Krume (20 cm) und dem krumennahen Unterboden (35 cm) entsprechend der Hauptbodenart herangezogen und verrechnet. Es findet eine Unterscheidung zwischen wendender und konservierender Bodenbearbeitung statt. Als Korrekturfaktor zur Stabilität des Bodengefüges wird der aktuelle Bodenwassergehalt (differenziert nach 3 Fruchtartengruppen) zum Zeitpunkt der Befahrung einbezogen.
- *Berechnung des Bodendruckes*  
Die Berechnung des vertikalen Bodendruckes erfolgt nach dem Ansatz von KOOLEN et al. (1992). Der Bodendruck wird danach aus Radlast und Reifeninnendruck in der entsprechenden Tiefe ermittelt. Analog zur Berechnung der Gefügestabilität dient der tatsächliche Bodenwassergehalt zum Zeitpunkt der Befahrung als Korrekturfaktor für die Berechnung des Bodendruckes.
- *Berechnung des Belastungsindex*  
Aus der Differenz von Bodendruck und Bodengefügestabilität wird für jede einzelne Überfahrt ein dimensionsloser Belastungsindex errechnet. Der Wertebereich des Index liegt bei  $\geq 0$  bis 1 und verweist bei zunehmenden Indizes auf eine Überschreitung der Gefügestabilität. Somit ist mit einer steigenden Belastungsgefährdung je Überfahrt zu rechnen. Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Indexwerte bis auf Betriebsebene aggregiert.

## 4.8 Bodenerosion durch Wasser

Neben der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit zählt die Reduktion des Bodenabtrags durch Wind und Wasser zu dem wesentlichsten Eckpfeiler des Bodenschutzes.

Aufgrund prognostizierter Veränderungen im Wettergeschehen sowie verringerte Bodenbedeckungsgrade ackerbaulich genutzter Standorte wird eine steigende Erosionsgefährdung nicht nur global, sondern laut STEININGER und WURBS (2011) auch für das Bundesgebiet vorhergesagt. Oftmals stellen Erosionsereignisse durch Starkregenereignisse oder starken Winden eine potenzielle Gefahrenquelle für das öffentliche Leben dar. Ausgangspunkt sind meist landwirtschaftlich genutzte Flächen, da diese einer ständigen und teilweise intensiven Bewirtschaftung unterliegen (FAO 2015). Angesichts dessen kommt dem Erosionsschutz im landwirtschaftlichen Betrieb eine besondere Bedeutung zu. Um jedoch geeignete Vorsorgemaßnahmen im Produktionsprozess ergreifen zu können, sollte der potenzielle Bodenabtrag in Tonnen je Jahr berechnet werden. Bereits seit 2004 ist dieser Grundsatz in der Direktzahlungsverpflichtungsverordnung (DirektZahlVerpflV) in §2 gesetzlich festgehalten und gilt seither als Kriterium zum Erhalt landwirtschaftlicher Direktzahlungen. Die darin angegebene Berechnungsgrundlage nach DIN 19708: „Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG“ spiegelt sich im Berechnungsalgorithmus des Modells REPRO wieder. Die Anwendung der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) nach SCHWERTMANN et al. 1990 dient der „[...] realistische[n] [und] quantitative[n] Abschätzung der Erosionsgefahr [...]“ an einem Standort bei bekannten Standorteigenschaften und unter Berücksichtigung bedeutender Einflussfaktoren.

$$A = R * K * C * L * S$$

**Gleichung 17**

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	t ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Bodenabtrag
R		Erosivität der Niederschläge (Starkregenanfälligkeit)
K		Erodibilität des Bodens
C		Faktor für die Bodenbedeckung und die Bearbeitung
L		Faktor für die Hanglänge
S		Faktor für die Hangneigung

Durch die Eingabe der schlag- und fruchtartspezifischen Daten im Modell REPRO wird im Zuge der Berechnung der C-Faktor ermittelt, welcher von der Fruchtart, der Zwischenfrucht und der Bearbeitung (konservierend/wendend) beeinflusst wird. Durch die Zuordnung von Wetterstationen und der damit eingehenden Erfassung der Tageswerte von Niederschlagsdaten kann der R-Faktor im Modell REPRO ermittelt werden. Die Berechnung der Faktoren L, S und K bedürfen einer dreidimensionalen Überführung, die mit Hilfe eines digitalen Geländemodells (DGM) erfolgt. Folglich werden die im Betrieb vorliegenden digitalen Schlagkonturen (GIS- Daten, Shape-Format) im Geländemodell mit dem vorliegendem Relief verschnitten, sodass sowohl die Hangneigung als auch die Hanglänge im Abstand von fünf Metern berechnet werden können.

Schlussendlich wird über die Verknüpfung der Faktoren der mittlere Bodenabtrag für jeden einzelnen Schlag ermittelt, welcher als gewichteter Mittelwert für den gesamten Betrieb ausgegeben wird.

Der berechnete potenzielle Bodenabtrag wird anschließend mit dem definierten Zielwert verglichen und auf seine Gefährdung hin bewertet.

## 4.9 Biodiversität

Im Rahmen der Diskussionen über die Nachhaltigkeit von Landnutzungssystemen spielt „Biodiversität“ eine wichtige Rolle. In der Konvention zur Biologischen Vielfalt (CBD) umfasst der Begriff der „Biodiversität“:

- die Vielfalt von Arten und Lebensräumen,
- die genetische Vielfalt sowie
- die Vielfalt der zwischen den Organismen bestehenden Interaktionen und ihrer Beziehungen zur Umwelt.

Damit wird deutlich, dass Biodiversität umfassend definiert ist und in Abhängigkeit vom jeweils betrachteten Bereich der „Biodiversität“ und den jeweiligen Forschungszielen deutlich unterschiedliche methodische Ansätze zur Erfassung von „Biodiversität“ verfolgt werden.

Im Modell REPRO sind die Interaktionen zwischen Bewirtschaftungsmaßnahmen und Biodiversität berücksichtigt (HEYER und CHRISTEN 2009). Es ist ein qualitativer Ansatz nach SIEBRECHT und HÜLSBERGEN (2008), der durch elf indirekte Indikatoren beschrieben wird (ROEDENBECK 2004). Demnach erfolgen keine Artaufnahmen und -zählungen auf den Flächen, sondern es wird das Potenzial eines Betriebes zum Nutzen und Erhalt der Biodiversität über diese Wechselwirkungen abgeschätzt. Die Aufgliederung der elf Teilindikatoren auf die drei Wirkungsbereiche Strukturen, Inputs (Intensität) und Maßnahmen und ihre Gewichtung untereinander, wird mit Tabelle 7 verdeutlicht.

**Tabelle 7: Indirekte Indikatoren und Wichtungsfaktoren zur Berechnung des Biodiversitätspotenzials**

Biodiversitätspotenzial					
Strukturen (0,5)	WF	Inputs (0,25)	WF	Maßnahmen (0,25)	WF
Nutzungs- und Anbaudiversität ( <i>Nutzungsdiversität</i> <i>Fruchtgruppendiversität</i> <i>Fruchtartendiversität</i> <i>Sortendiversität</i> )	0,3	Anteil LN o. PSM	0,125	Bodenbearbeitung	0,025
		PSM- Behandlungsindex	0,0625	Ernte	0,1
				Nutzungshäufigkeit GL	0,0625
		Düngungsintensität	0,0625	Überrollhäufigkeit	0,0625
Schlaggröße	0,05				
mittl. Randlänge	0,1				
Variationskoeffizient	0,05				

Die Komplexität des Indikators macht es erforderlich, das Vorgehen für die Gesamtbewertung in Teilschritten zu untergliedern. Jedes Anbaujahr wird nach dem folgenden Schema bearbeitet:

1. Ermittlung des Sachwertes für den jeweiligen Teilindikator auf der jeweiligen Analyseebene.
2. Bewertung des Sachwertes auf der jeweiligen Bewertungsebene mit spezifischer Bewertungsfunktion.
3. Aggregation der Teilindikatoren auf Grundlage ihrer Gewichtung zum Indikator Biodiversität.

Zur Berechnung des Indikators wird das gewichtete arithmetische Mittel über die einzelnen Anbaujahre gebildet. Eingangswerte sind die Bewertungsergebnisse (normierte Werte) der Teilindikatoren mit den jeweiligen Wichtungsfaktoren. Bezugsebene des Ergebnisses ist der Gesamtbetrieb. Der zeitliche und räumliche Bezug wird durch die Teilindikatoren und die betrachteten Komponenten bestimmt.

## Struktur

Die Teilindikatoren geben Merkmale zum Angebot von Vegetationsstrukturen und damit Informationen zu Biotopen auf den bewirtschafteten Flächen. So gibt die Nutzungsstruktur Auskunft über das Angebot von verschiedenen Lebensräumen innerhalb des Betriebes (Nischenangebot). Die Anbaustruktur charakterisiert das Anbauspektrum (Diversität) und die Kulturarteneinflüsse. Anhand der Flächenstruktur wird Größe und Ausformung der Bewirtschaftungsflächen beschrieben, dabei reduzieren steigende Flächengrößen das Vorkommen von „Restflächen“ und Ökotonen und führen zu einer Vereinheitlichung und Konzentration der Nutzung, wodurch zunehmende Umweltbelastungen zu erwarten sind (vgl. HABER 2002).

### A) Nutzungs- und Anbaudiversität

Für die Analyse der Nutzungs- und Anbaudiversität werden die Sachwerte der verwendeten Teilindikatoren (Nutzungs-, Fruchtgruppen-, Fruchtarten- und Sortendiversität) mit den entsprechenden Wichtungen zur Gesamtdiversität addiert. Anschließend wird der aggregierte Sachwert bewertet.

Grundlage zur Ermittlung der Sachwerte der einzelnen Teilindikatoren ist der Shannon-Index (H), der neben der Anzahl von Einheiten (z.B. Fruchtarten) auch deren Abundanz (Anteil an einer Gesamtheit) berücksichtigt. Für die Nutzungsdiversität werden beispielsweise die Nutzungstypen (Ackerland, Grünland, Brache) berücksichtigt. Für die Fruchtgruppendifersität erfolgt dann eine Aufspaltung der Nutzungstypen (z.B. Ackerland) in entsprechende Untereinheiten (z.B. Hackfrüchte, Getreide,...).

### B) Flächenstrukturen

Indikatoren für die Flächenstruktur sind neben der Schlaggröße, die jeweilige Randlänge und der Variationskoeffizient der Schlaggröße. Die Teilindikatoren basieren auf Angaben der digitalen Schlagkonturen (GIS-Daten). Dabei ist ein Schlag die dokumentierte Flächeneinheit. Ein Teilschlag ist Teil eines Schlages, der als kleinste Bewirtschaftungseinheit geführt und einheitlich bewirtschaftet wird. Die mittlere Schlaggröße entspricht dem Mittelwert aus allen Teilflächen.

Die Randlänge wird auf Teilschlagebene bewertet. Dabei wird die schlagspezifische Randlänge (UR) mit dem Umfang eines Kreises ( $U_K$ ) und eines Quadrats ( $U_Q$ ) mit der gleicher Flächengröße wie der Schlag in Beziehung gesetzt (Gleichung 18, 19).

$$U_Q = 4 * \sqrt{A}$$

**Gleichung 18**

$$U_K = 2 * \pi * \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

**Gleichung 19**

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$U_Q$	m	Umfang Quadrat
$U_K$	m	Umfang Kreis
A	m <sup>2</sup>	Teilschlaggröße

Der Variationskoeffizient, als weiterer Teilindikator, berechnet sich nach Gleichung 20.

$$\text{Variationskoeffizient} = \text{Standardabweichung} / \text{Mittelwert}$$

**Gleichung 20**

## Inputs

Inputs charakterisieren Umweltwirkungen landwirtschaftlicher Betriebe, die in Form stofflicher Komponenten wirken und die Qualität der Biotope bzw. der Nischen beeinflussen. Potentielle Effekte sind Eutrophierung und Belastungen durch Pflanzenschutzmittel (vgl. GEIER & KÖPKE 2000; BASTIAN & SCHREIBER 1999). Die Teilindikatoren werden im Wesentlichen durch die Intensität des Anbausystems bestimmt und weisen daher eine hohe Sensitivität gegenüber den landwirtschaftlichen Maßnahmen auf.

#### A) Anteil der landwirtschaftliche Nutzfläche ohne PSM

Zur Ermittlung des Anteils der LN ohne Pflanzenschutzmaßnahmen werden die Teilschläge des Betriebes nach durchgeführten Verfahren des Pflanzenschutzes abgefragt. Die Flächengrößen der Teilschläge ohne Pflanzenschutzmaßnahmen werden addiert und der Anteil an der gesamten LN bestimmt.

#### B) Gesamtbehandlungsindex

Die Kennzeichnung der Intensität des Pflanzenschutzes erfordert neben der Erfassung der Anzahl der Applikationen die Berücksichtigung der Anwendungskonzentrationen und der behandelten Fläche. Die Ermittlung des Teilindikators Gesamtbehandlungsindex erfolgt analog zur Vorgehensweise des normierten Behandlungsindex. Allerdings erfolgt die Bewertung an einer einheitlichen, speziell unter Aspekten der Biodiversität erarbeiteten Bewertungskurve auf Ebene des Teilschlages. Abschließend wird der gewichtete Mittelwert der Bewertungen für den Gesamtbetrieb berechnet.

#### C) Düngungsintensität

Veränderung des Nährstoffhaushaltes und die Intensität der Bewirtschaftung lassen sich anhand der Zufuhr mineralischer und organischer Dünger abschätzen. Zur Analyse des Teilindikators Düngungsintensität werden die teilschlagspezifischen Mengen der gesamten mineralischen N-Zufuhr ermittelt. Der mineralisch wirkende Stickstoff der Wirtschaftsdünger wird auf Basis der REPRO Stammdaten und nach Abzug der Ausbringungsverluste zur Gesamtzufuhr addiert.

### Maßnahmen

Mit den Teilindikatoren aus der Gruppe Maßnahmen werden Effekte erfasst, die direkte oder indirekte Wirkungen auf die Biodiversität haben. Direkte Wirkungen sind solche, die sich mit der Maßnahme oder unmittelbar danach auf Organismen auswirken. Diese sind das Resultat von physikalisch-mechanischen, chemischen Effekten (Kontakt zu den Organismen) oder Störungen (Wahrnehmung). Die indirekten Wirkungen zeichnen sich hingegen dadurch aus, dass sie auf Organismen durch die Veränderung von Ressourcen (Nahrungsketten), dem Standort/Habitat oder Interaktionen mit anderen Organismen entstehen. Im Gegensatz zu den direkten Wirkungen haben sie keinen unmittelbaren zeitlichen Bezug (vgl. PROCHNOW & MEIERHÖFER 2003, BENTON et al. 2003).

#### A) Verfahrensdiversität Bodenbearbeitung bzw. Ernte

Insbesondere Ernte- und Bodenbearbeitung führen zu drastischen Änderungen des Entwicklungszustandes bzw. der Vegetationsstrukturen von Flächen. Dies kann vor allem bei großen Bewirtschaftungseinheiten oder der Synchronisation der Bewirtschaftung auf mehreren Betriebsflächen zu fehlenden Rückzugsräumen führen, wodurch die Habitats von Organismen eingeschränkt werden. (vgl. HEYER & CHRISTEN 2005; BENTON et al. 2003). Dabei gilt, je mehr Flächen sich im gleichen Entwicklungszustand befinden bzw. auf denen zur selben Zeit Maßnahmen durchgeführt werden, desto geringer ist das Nischenangebot.

#### B) Nutzungshäufigkeit und Überrollhäufigkeit

Die Analyse dieser Teilindikatoren basiert ebenfalls auf den Verfahren, die auf Ebene der Teilschläge erfasst sind. Zur Ermittlung der Nutzungshäufigkeit werden alle landwirtschaftlichen Nutzflächen mit mehrschichtigen Fruchtarten abgefragt (Grünland, Ackerfutter). Diese Fläche bildet die Bezugsgröße. Auf allen berücksichtigten Teilschlägen wird die Anzahl der Ernten (Schnitte) ermittelt und über die Bezugsfläche gewichtet gemittelt.

Für die Ermittlung der Überrollhäufigkeit werden alle relevanten Maßnahmen auf den Teilschlägen summiert, die eine Überfahrt der Fläche verursachen. Die teilschlagbezogenen Werte werden über die gesamte Ackerfläche gemittelt und bewertet.

# 5 Ergebnisse

Nachfolgend werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Indikatoren erläutert. Zunächst werden diese für den Durchschnitt der Projektbetriebe dargestellt. Anschließend erfolgt die Aufgliederung nach den Projektregionen Nord, Ost, Süd und West. Dabei werden teilweise Indikatoren zusammen betrachtet, da die ökologische Nachhaltigkeit ein Zusammenwirken aller Indikatoren darstellt.

## 5.1 Betriebsstrukturen des durchschnittlichen Projektbetriebes

Nach der Erfassung und Bearbeitung aller Betriebsdaten konnte ein durchschnittlicher Projektbetrieb mit spezifischer Flächenausstattung und Viehbesatz abgeleitet werden. Diese Daten sind in nachstehender Tabelle 8 als Mittelwerte zusammengefasst.

**Tabelle 8: Flächenausstattung in ha und Viehbesatz in GV ha<sup>-1</sup> des durchschnittlichen Projektbetriebes (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe)**

Fruchtgruppen	Durchschnitt der Projektbetriebe	
	ha	%
Getreide	217	48
<i>Winterweizen</i>	117	54
<i>Wintergerste</i>	44	20
<i>Winterroggen</i>	24	11
<i>Triticale</i>	9	4
<i>Sommergerste</i>	18	8
<i>Hafer</i>	3	2
<i>Sonstige</i>	2	1
Raps	73	16
Zuckerrüben	26	6
Kartoffeln	5	1
Mais	46	10
Futterpflanzen	21	5
Sonstige Kulturen	16	4
Grünland	46	10
<b>Gesamtfläche</b>	<b>450</b>	<b>100</b>
<b>Viehbesatz</b>	<b>GV ha<sup>-1</sup></b>	<b>0,51</b>

Es geht hervor, dass die Spannweite der 32 Betriebe von 32 ha bis 2.610 ha reicht.

Der durchschnittliche Betrieb im Projektverbund verfügt über eine Gesamtfläche von 450 ha. Diese Fläche wird zu 90 % ackerbaulich genutzt, die weiteren 10 % stehen als Grünland zur Verfügung.

Aufgegliedert nach Fruchtgruppen dominiert im Durchschnitt der Getreideanbau mit 48 %. Gefolgt von Raps (16 %), Mais (10 %) und den Hackfrüchten Zuckerrüben und Kartoffeln mit 7 %. Der Anbau von Feldfutter nimmt weitere 5 % des tatsächlichen Anbauspektrums ein. Die übrigen 4 % entfallen auf sonstige angebaute Kulturen wie Hülsenfrüchte und Sommerungen von Weizen bzw. Roggen.

Der mittlere Tierbesatz in dem durchschnittlichen Projektbetrieb liegt bei 0,51 GV ha<sup>-1</sup>. Da die Tierhaltung im Projekt nicht auf seine Nachhaltigkeitsleistungen untersucht wurde, dient dieser Produktionsteil als Abnehmer pflanzlicher Produkte zur Fütterung, sowie als Lieferant von organischen Düngern für den Pflanzenbau.

## 5.2 Ergebnisse der Einzelindikatoren – Durchschnittlicher Projektbetrieb

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Einzelindikatoren für den Durchschnitt der Projektbetriebe beschrieben. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die hier vorgestellten Ergebnisse einzig auf den Bewirtschaftungsdaten der Projektbetriebe beruhen, die nach den Kriterien in Kapitel 2 ausgewählt wurden.

### 5.2.1 Nährstoff- und Humusbilanzen

Im Bereich der Nährstoffbilanzen wird der erweiterte Stickstoffsaldo in  $\text{kg N ha}^{-1}$  und der korrigierte Phosphorsaldo in  $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  dargestellt. Die Ergebnisse der Humusbilanz werden, wie beschrieben, nach der dynamischen Berechnungsmethode in  $\text{kg C ha}^{-1}$  berechnet und abgebildet.

**Tabelle 9: Erweiterter N-Saldo in  $\text{kg N ha}^{-1}$  (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet)**

Bilanzglieder	Einheit	Durchschnitt der Projektbetriebe
Nährstoffentzug ges.	$\text{kg N ha}^{-1}$	201
N-Immissionen	$\text{kg N ha}^{-1}$	20
Saat-/Pflanzgut	$\text{kg N ha}^{-1}$	2
Symbiotische N-Zufuhr ges.	$\text{kg N ha}^{-1}$	4
Organische Düngung ges.	$\text{kg N ha}^{-1}$	101
<i>Strohdüngung</i>	<i><math>\text{kg N ha}^{-1}</math></i>	24
<i>Gründüngung</i>	<i><math>\text{kg N ha}^{-1}</math></i>	34
<i>Stalldung</i>	<i><math>\text{kg N ha}^{-1}</math></i>	4
<i>Gülle</i>	<i><math>\text{kg N ha}^{-1}</math></i>	33
<i>Jauche</i>	<i><math>\text{kg N ha}^{-1}</math></i>	0
<i>Sonstige</i>	<i><math>\text{kg N ha}^{-1}</math></i>	7
Mineraldünger ges.	$\text{kg N ha}^{-1}$	133
Nährstoffzufuhr ges.	$\text{kg N ha}^{-1}$	260
Änderung Boden-N-Vorrat	$\text{kg N ha}^{-1}$	-12
<b>NÄHRSTOFFSALDO</b>	<b><math>\text{kg N ha}^{-1}</math></b>	<b>71</b>

Im Durchschnitt der Projektbetriebe ergibt die Gegenüberstellung von Stickstoffentzug und Stickstoffzufuhr einen Stickstoffsaldo von  $71 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

Eine genauere Betrachtung der Stickstoffzufuhr zeigt, dass rund 51 % des Stickstoffs aus dem Einsatz mineralischer Düngemittel und weitere 39 % aus dem Einsatz organischer Dünger stammen.

Dabei umfasst die Bilanzgröße organische Düngung sowohl die Strohdüngung als auch eingesetzte Wirtschaftsdünger. Diesbezüglich dominiert die Einarbeitung von Stroh- und Grünmasse mit rund 57 % die organische Stickstoffzufuhr. Weiterhin werden ca. 33 % über Gülle zugeführt, rund 7 % über sonstige organische Düngemittel und etwa 4 % über den Einsatz von Stalldung (Festmist, Kompost).

Im Gegensatz zu einfachen N-Bilanzrechnungen (z.B. Hoftorbilanz) fließen

zusätzlich zur mineralischen und organischen Düngung auch N-Immissionen und der symbiotisch fixierte Stickstoff in die Bilanzierung ein. Darüber hinaus wird im erweiterten N-Saldo die Mineralisation von Stickstoff aus dem Humuspool (Änderung Boden-N-Vorrat) berücksichtigt. Hierdurch ergibt die Analyse über alle Projektbetriebe diesbezüglich einen Zuschlag von  $12 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

Wie stark die N-Salden über die Gesamtheit der 32 Betriebe schwanken verdeutlicht Abbildung 6. Demnach liegt der niedrigste erweiterte Saldo bei  $27 \text{ kg N ha}^{-1}$  und der höchste bei rund  $167 \text{ kg N ha}^{-1}$  im 3-jährigen Mittel.

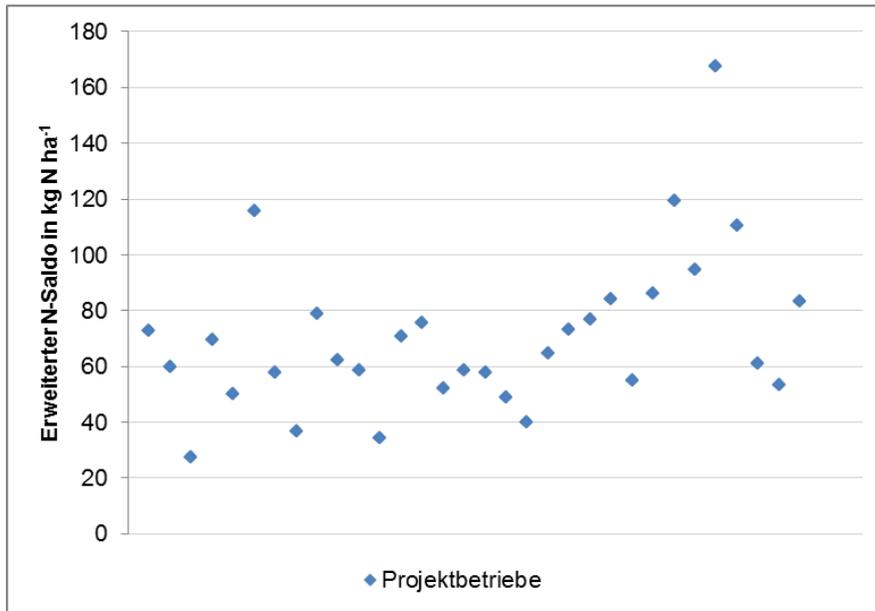


Abbildung 6: Erweiterter N-Saldo in  $\text{kg N ha}^{-1}$  (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe)

Die in Tabelle 10 dargestellten Ergebnisse des Phosphorsaldos zeigen, dass der Phosphorbedarf der Pflanzen während der Vegetation weder durch mineralische noch durch organische Düngung gedeckt wird. Im Mittel der 32 Betriebe wird ein Saldo von  $-11 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  erreicht.

Tabelle 10: P-Saldo in  $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet)

Bilanzglieder	Einheit	Durchschnitt der Projektbetriebe
Nährstoffentzug ges.	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	90
Saat-/Pflanzgut	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	1
Organische Düngung ges.	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	54
Strohdüngung	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	13
Gründüngung	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	11
Stalldung	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	2
Gülle	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	20
Jauche	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	0
Sonstige	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	7
Mineraldünger ges.	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	25
Nährstoffzufuhr ges.	$\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$	79
<b>NÄHRSTOFFSALDO</b>	<b><math>\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}</math></b>	<b>-11</b>
<b>Nährstoffsaldo mit Korrektur</b>	<b><math>\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}</math></b>	<b>-15</b>

Dieses bestehende Defizit steigt mit der in Kapitel 4 erläuterten Korrektur des Saldos um die Bodengehaltsklassen weiter an, dadurch liegt der mittlere Saldo bei  $-15 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ .

Die realisierte Nährstoffzufuhr wird zu 68 % über organische und zu 32 % über mineralische Düngemittel gedeckt. Somit wird mehr als doppelt so viel Phosphor über organische Düngung zugeführt, als über mineralische Düngemittel.

Im Bereich der organischen Düngung bestimmen wiederum die Stroh- und Gründüngung mit circa 44 % die Nährstoffzufuhr. Weitere 37 % werden über den Einsatz von Gülle und 18 % über die Ausbringung von Stalldung und sonstigen organischen Düngern zugeführt.

Die dynamische Humusbilanz umfasst einerseits den Bedarf, den der Landwirt durch den Anbau und die Fruchtfolge gestalten kann. Darüber hinaus haben die schlagspezifischen Bodeneigenschaften und die klimatischen Gegebenheiten Einfluss auf den Bedarf der angebauten Kulturen. Diese Faktoren sind durch den Bewirtschafter nicht änderbar, da diese standortabhängig sind. Der Landwirt kann aber über die Zufuhr organischen Materials das Ergebnis der Bilanzierung positiv, wie auch negativ beeinflussen.

**Tabelle 11: Humusbilanz (dynamisch) in kg C ha<sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet)**

Bilanzglieder	Einheit	Durchschnitt der Projektbetriebe
Humusbruttobedarf	kg C ha <sup>-1</sup>	-667
Humusmehrerleistung	kg C ha <sup>-1</sup>	25
Saat-/Pflanzgut	kg C ha <sup>-1</sup>	0
Strohdüngung	kg C ha <sup>-1</sup>	325
Gründüngung	kg C ha <sup>-1</sup>	73
Organische Düngung ges.	kg C ha <sup>-1</sup>	119
<i>Stalldung</i>	<i>kg C ha<sup>-1</sup></i>	<i>24</i>
<i>Gülle</i>	<i>kg C ha<sup>-1</sup></i>	<i>57</i>
<i>Sonstige</i>	<i>kg C ha<sup>-1</sup></i>	<i>38</i>
Humusersatzleistung ges.	kg C ha <sup>-1</sup>	542
<b>HUMUSSALDO</b>	<b>kg C ha<sup>-1</sup></b>	<b>-124</b>

Hinsichtlich des Humussaldos konnte im Mittel der Projektbetriebe ein Humusabbau nachgewiesen werden. Dieser liegt im 3-jährigen Mittel bei -124 kg C ha<sup>-1</sup>. Neben der organischen Düngung stellt die Zufuhr von Kohlenstoff aus der Stroh- und Gründüngung einen wesentlichen Bestandteil der Bilanz dar. Der prozentuale Anteil beträgt im Mittel der Projektbetriebe rund 73 %. Weitere 22 % humuswirksame Kohlenstoffverbindungen stammen aus dem Einsatz organischer Düngemittel, wobei Gülle und sonstige organische Dünger bevorzugt eingesetzt werden. Die restlichen 5 % ergeben sich aus den Humusmehrerleistungen, welche durch den Anbau von humusmehrenden Fruchtarten entstehen. Zusammengefasst zeigt die Bilanz,

dass der Bedarf der Kulturpflanzen an Kohlenstoff nicht vollständig und ausreichend über die Humusersatzleistungen gedeckt werden kann.

### 5.2.2 Pflanzenschutzintensität

Die Berechnung der Pflanzenschutzintensität, dargestellt als Behandlungsindex, wurde im Kapitel 3 bereits ausführlich erläutert. Zusammengefasst stellt dieser Indexwert eine Verknüpfung aller Pflanzenschutzmaßnahmen in Abhängigkeit von Anwendungskonzentration und Applikationsfläche dar.

**Tabelle 12: Behandlungsindices der wichtigsten Hauptfrüchte (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe)**

Hauptfrucht	Behandlungsindex
Winterweizen	5,1
Wintergerste	3,6
Winterroggen	3,2
Triticale	3,1
Sommergerste	3,5
Hafer	2,7
Winterraps	6,5
Zuckerrübe	6,5
Kartoffel	12,4
Mais	1,8

In der Tabelle 12 sind die Indices der zehn wichtigsten Hauptfrüchte zusammenfassend dargestellt.

Zu erkennen ist, dass insbesondere die Kartoffel am intensivsten mit Pflanzenschutzmitteln behandelt wird. Mit einem Wert von 12,4 liegt der Behandlungsindex fast doppelt so hoch wie die Werte von Zuckerrübe und Winterraps. An dieser Stelle ist natürlich zu berücksichtigen, dass die Ansprüche von Handel und Verbraucher an das Produkt Kartoffel sehr hoch sind. Um qualitativ einwandfreie Ware zu erzeugen, ist ein intensives Pflanzenschutzmanagement unabdingbar.

Unter den Getreidearten besitzt der Winterweizen mit 5,1 den höchsten Behandlungsindex. Der niedrigste Index wird für Mais ausgewiesen.

An dieser Stelle ist erkennbar, dass alle Kulturen einen unterschiedlichen Bedarf an das Pflanzenschutzmanagement stellen, somit ist eine Wertung zwischen den Kulturarten fachlich nicht möglich.

### 5.2.3 Energie- und Treibhausgasbilanz

Mit Erstellung der Energiebilanz ist es möglich die Energieintensität in  $\text{MJ GE}^{-1}$  abzubilden. Daraus kann die energetische Effizienz der Bewirtschaftung, hinsichtlich der produzierten Menge abgeleitet werden. In Tabelle 13 sind die Ergebnisse dieser Berechnung zusammengestellt sowie die einzelnen Bilanzglieder aufgeführt.

**Tabelle 13: Energiebilanz in  $\text{MJ GE}^{-1}$  (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet)**

Bilanzglieder	Einheit	Durchschnitt der Projektbetriebe
Energiebindung HP + NP	$\text{GJ ha}^{-1}$	155
Ertrag HP + NP	$\text{GE ha}^{-1}$	90
Einsatz fossiler Energie	$\text{GJ ha}^{-1}$	14
Org. Dünger ges.	$\text{GJ ha}^{-1}$	2
Mineraldünger ges.	$\text{GJ ha}^{-1}$	5
Saatgut ges.	$\text{GJ ha}^{-1}$	3
Pflanzenschutzmittel ges.	$\text{GJ ha}^{-1}$	1
Diesekraftstoff ges.	$\text{GJ ha}^{-1}$	3
Maschinen und Geräte ges.	$\text{GJ ha}^{-1}$	1
Energie-Output	$\text{GJ ha}^{-1}$	154
Energie-Gewinn	$\text{GJ ha}^{-1}$	140
<b>Energie-Intensität</b>	<b><math>\text{MJ GE}^{-1}</math></b>	<b>162</b>
Output/Input-Verhältnis		11

Der Einsatz fossiler Energie, in Form von direkter Energie (Diesel) wie auch indirekter Energie (Herstellung Dünger, PSM, Maschinen) kann aktiv vom Betriebsmanagement beeinflusst werden. Den größten Anteil am betrieblichen Verbrauch fossiler Energieträger hat der Mineraldünger. Über die weitere Verrechnung vom Einsatz fossiler Energie (umgerechnet in  $\text{MJ ha}^{-1}$ ) und dem Ertrag in  $\text{GE ha}^{-1}$  ergibt sich die Energieintensität, welche eine Aussage über die Effizienz der Produktion erlaubt. Im Mittel der Projektbetriebe wird ein Wert von  $162 \text{ MJ GE}^{-1}$ .

Eine weitere interessante Kennzahl der Energiebilanzierung ist das Output/Input-Verhältnis. Dies stellt dar, wieviel Energie pro eingesetztes GJ produziert wird. Im

Durchschnitt der Projektbetriebe konnte ein Output/Input-Verhältnis von 11 ermittelt werden. Das bedeutet, es wird 11-mal mehr Energie gewonnen als in die Produktion investiert wurde.

Für die anschließende Berechnung der Treibhausgasbilanz in  $\text{kg CO}_2 \text{ äq GE}^{-1}$  liefern die Stickstoff- und Humusbilanz sowie die Energiebilanz wichtige Bilanzglieder, welche in Tabelle 14 aufgeführt sind.

**Tabelle 14: Treibhausgasbilanz in  $\text{kg CO}_2 \text{ äq GE}^{-1}$  (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet)**

Bilanzglieder	Einheit	Durchschnitt der Projektbetriebe
C-Sequestrierung*	$\text{kg CO}_2 \text{ äq ha}^{-1}$	451
$\text{CO}_2$ -Emissionen Anbau	$\text{kg CO}_2 \text{ äq ha}^{-1}$	990
$\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen	$\text{kg CO}_2 \text{ äq ha}^{-1}$	1.161
THG-Emissionen (ha)	$\text{kg CO}_2 \text{ äq ha}^{-1}$	2.602
THG-Emissionen (GJ)	$\text{kg CO}_2 \text{ äq GJ}^{-1}$	17
<b>THG-Emissionen (GE)</b>	<b><math>\text{kg CO}_2 \text{ äq GE}^{-1}</math></b>	<b>29</b>

\* positiver Wert= C- Freisetzung aus dem Boden/ negativer Wert= C-Speicherung im Boden

45 % der gesamten THG-Emissionen entstehen durch Stickstoffemissionen in Form von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) aus dem Boden. Weitere 38 % werden durch die energetischen Aufwendungen im Produktionsablauf emittiert. Auch die Emissionen aus dem errechneten negativen Humussaldo (Freisetzung von Kohlenstoff durch Hu-

musabbau) entsprechen in der Bilanz einem Anteil von rund 17 %. Die ertragsbezogene Umrechnung der Treibhausgasemissionen ergibt Emissionen in Höhe von  $29 \text{ kg CO}_2 \text{ äq je produzierter Getreideeinheit}$ .

### 5.2.4 Bodenschadverdichtung und Erosion durch Wasser

In der Tabelle 15 werden die Ergebnisse der Schadverdichtungsgefährdung über alle Verfahrensabschnitte im Produktionsverlauf bis zu einer Tiefe von 35 cm dargestellt.

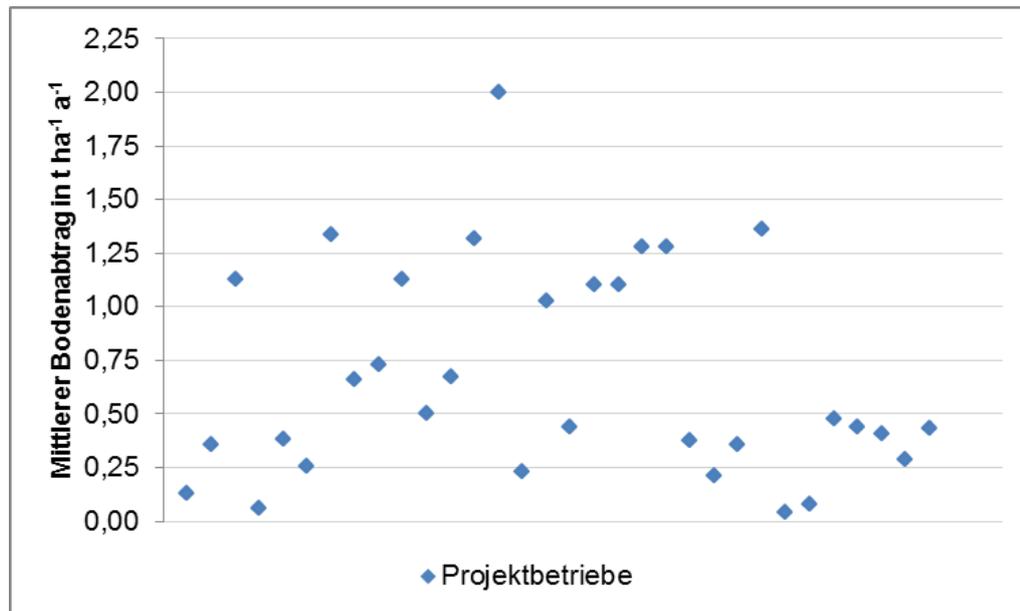
**Tabelle 15: Schadverdichtungsgefährdung des krumennahen Unterbodens (35 cm) als Index (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe, gerundet)**

Bilanzglieder bzw. Verfahrensabschnitt	Durchschnitt der Projektbetriebe
Bodenbearbeitung	0,11
Bestellung	0,03
Min. Düngung	0,11
Org. Düngung	0,10
Pflanzenschutz	0,04
Ernte HP	0,10
<b>Verdichtungsgefährdung</b>	<b>0,09</b>

So zeigt sich eine mittlere Verdichtungsgefährdung für die Abschnitte Bodenbearbeitung, mineralische und organische Düngung sowie für die Ernte der Hauptprodukte. Für die Verfahrensabschnitte Bestellung und Pflanzenschutz konnten im Mittel der Projektbetriebe niedrige Belastungsindizes ermittelt werden.

Im Gesamtergebnis der Analyse aus drei Bewirtschaftungsjahren besteht im Durchschnitt der Projektbetriebe ein geringes Verdichtungsrisiko der Böden.

Im Durchschnitt der Projektbetriebe wurde ein mittlerer Bodenabtrag von  $0,67 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  berechnet. Wie auch Abbildung 7 verdeutlicht, differieren die Werte zwischen den Projektbetrieben stark. So konnten der niedrigste Bodenabtrag mit  $0,04$  und der höchste mit  $2,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  im Zuge der Berechnung ermittelt werden.



**Abbildung 7: Bodenabtrag in  $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe)**

### 5.2.5 Biodiversität

In folgender Tabelle 16 sind die Ergebnisse der drei relevanten Wirkungsbereiche Strukturen, Inputs und Maßnahmen mit den jeweiligen Teilindikatoren zusammengefasst dargestellt. Da die reinen Ergebnisse der Teilindikatoren keine Aussagen über das Biodiversitätspotenzial in den Betrieben geben können, werden die bewerteten Ergebnisse in Kapitel 5 dargestellt.

**Tabelle 16: Ergebnisse der 11 Teilindikatoren des Biodiversitätspotenzials (3-jähriger Mittelwert der 32 Projektbetriebe)**

Bilanzglieder		Einheit	Durchschnitt der Projektbetriebe
STRUKTUREN	Sortendiversität		2,68
	Fruchtartendiversität		1,45
	Fruchtgruppendifersität		1,29
	Nutzungsdiversität		0,18
	Nutzungs-/Anbaudiversität		1,02
	mittlere Randlänge	100m	13,92
	mittlere Teilschlaggröße	ha	6,42
	Variationskoeffizient Teilschlaggröße	%	100,75
INPUTS	Anteil der landw. Fläche ohne PSM	%	7,18
	Behandlungsindex bewertet		0,30
	Düngungsintensität (Stickstoff)	kg ha <sup>-1</sup>	156,7
MAßNAHMEN	Verfahrensdiversität Bodenbearbeitung - AL		0,28
	Verfahrensdiversität Ernte		0,17
	Nutzungshäufigkeit Grünland + Ackerfutter	Anzahl Jahr <sup>-1</sup>	1,17
	Überrollhäufigkeit	Anzahl Jahr <sup>-1</sup>	12,14

## 5.3 Regionale Betriebsstrukturen

Um die nachfolgenden Ergebnisse diskutieren zu können, sind in Tabelle 17 die regionalen Betriebsstrukturen nach Flächenausstattung und Viehbesatz zusammengefasst. Dazu ist jeweils der Mittelwert für eine Region über die zugeordneten Projektbetriebe gebildet wurden.

So lassen sich in der Region Ost die größten und in der Region Süd die kleinsten Betriebe hinsichtlich der Flächenausstattung ausmachen. Davon werden 87 % als Ackerland genutzt. Somit kann ebenfalls für die Region Ost der höchste Grünlandanteil mit 13 % festgestellt werden. Die regionalen Fruchtfolgen werden überwiegend von den Getreidekulturen Winterweizen und Gerste, darunter sowohl Winter- als auch Sommergerste, bestimmt. Neben den Getreidekulturen werden hauptsächlich Raps, Zuckerrüben, Kartoffeln, Mais und Futterpflanzen angebaut. Diese nehmen je nach Region unterschiedlich hohe Anteile innerhalb der Fruchtfolgen an.

Der weiterhin aufgeführte Viehbesatz in GV ha<sup>-1</sup> verdeutlicht, dass die Regionen Nord (1,43) und West (0,95) über die höchsten Besatzdichten je Hektar verfügen. Der höchste einzelbetriebliche Viehbesatz in diesem Projekt liegt bei 5,7 GV ha<sup>-1</sup>.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass es durchaus Landkreise und Regionen gibt, in denen weit über 2 GV ha<sup>-1</sup> gehalten werden. Diese besonderen Hot-Spot-Regionen sollten in weiterführenden Untersuchungen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitsleistungen analysiert werden.

**Tabelle 17: Flächenausstattung in ha und %; Viehbesatz in GV ha<sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert)**

	Nord		Ost		Süd		West	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Getreide	112	49,5	507	45,4	82	61,6	115	57,8
<i>Winterweizen</i>	73	32,3	250	22,4	53	39,8	65	32,6
<i>Wintergerste</i>	8	3,5	131	11,7	13	9,8	11	5,6
<i>Winterroggen</i>	6	2,7	76	6,8	1	0,8	4	1,8
<i>Triticale</i>	5	2,2	27	2,4	0	0	1	0,4
<i>Sommergerste</i>	15	6,6	14	1,3	9	6,8	34	17,3
<i>Hafer</i>	2	0,9	7	0,6	0	0	0	0,1
<i>Sonstige</i>	3	1,3	2	0,2	6	4,5	0	0,0
Raps	37	16,4	191	17,1	14	10,5	28	14,1
Zuckerrüben	25	11,1	35	3,1	23	17,3	18	8,9
Kartoffeln	12	5,3	3	0,3	4	3,1	0	0,0
Mais	29	12,8	116	10,4	4	3,0	20	10,0
Futterpflanzen	1	0,4	75	6,7	1	0,8	0	0,0
Sonstige Kulturen	5	2,2	43	3,8	4	3,0	4	1,9
Grünland	5	2,2	147	13,2	1	0,8	14	7,2
<b>Gesamtfläche</b>	<b>226</b>	<b>100</b>	<b>1.117</b>	<b>100</b>	<b>133</b>	<b>100</b>	<b>199</b>	<b>100</b>
<b>Viehbesatz in GV ha<sup>-1</sup></b>		<b>1,43</b>		<b>0,30</b>		<b>0,18</b>		<b>0,95</b>

## 5.4 Ergebnisse der Einzelindikatoren - Regionen

In diesem Abschnitt werden die einzelbetrieblichen Ergebnisse für die vorab definierten Regionen (Nord, Ost, Süd, West) vergleichend dargestellt. Die Zusammenfassung der untersuchten Indikatoren erfolgt analog zum Kapitel 5.2.

### 5.4.1 Nährstoff- und Humusbilanzen

**Tabelle 18: Erweiterter N-Saldo in kg N ha<sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet)**

Bilanzglieder	Einheit	Nord	Ost	Süd	West
Nährstoffzug ges.	kg N ha <sup>-1</sup>	211	171	227	190
N-Immissionen	kg N ha <sup>-1</sup>	20	20	20	20
Saat-/Pflanzgut	kg N ha <sup>-1</sup>	2	2	3	2
Symbiotische N-Zufuhr ges.	kg N ha <sup>-1</sup>	2	7	3	2
Organische Düngung ges.	kg N ha <sup>-1</sup>	159	72	81	72
<i>Strohdüngung</i>	kg N ha <sup>-1</sup>	25	19	28	24
<i>Grümdüngung</i>	kg N ha <sup>-1</sup>	39	15	48	33
<i>Stalldüngung</i>	kg N ha <sup>-1</sup>	0	14	0	0
<i>Gülle</i>	kg N ha <sup>-1</sup>	84	16	2	10
<i>Jauche</i>	kg N ha <sup>-1</sup>	1	0	0	0
<i>Sonstige</i>	kg N ha <sup>-1</sup>	10	8	3	5
Mineraldünger ges.	kg N ha <sup>-1</sup>	111	126	172	138
Nährstoffzufuhr ges.	kg N ha <sup>-1</sup>	294	227	278	234
Änderung Boden-N-Vorrat	kg N ha <sup>-1</sup>	-10	-8	-16	-15
<b>NÄHRSTOFFSALDO</b>	<b>kg N ha<sup>-1</sup></b>	<b>92</b>	<b>64</b>	<b>68</b>	<b>59</b>
Nährstoffverwertung	%	72	75	81	81

Nach folgender Reihenfolge ergeben sich die regionalen N-Salden: Nord > Süd > Ost > West.

Wie bereits aus dem Abschnitt 5.3 hervorging, kennzeichnet sich die Region Nord durch einen hohen Viehbesatz (1,43 GV ha<sup>-1</sup>), der einzelbetrieblich bis zu 5,7 GV ha<sup>-1</sup> betragen kann. Demnach fallen im Vergleich, in dieser Region mehr organische Dünger tierischer Herkunft an. Allein 54 % der Stickstoffzufuhr können bereits über die organische Düngung bereitgestellt werden. Trotz des angepassten Einsatzes mineralischer Düngemittel wird der Stickstoffentzug mehr als ausreichend gedeckt. Das Ergebnis der Bilanzierung der Stickstoffmengen in den Regionen Süd und Ost nimmt im Vergleich einen mittleren Wert ein.

Für die Regionen Süd und West fällt der vergleichsweise hohe Wert der Änderung des Boden-N-Vorrates in der Bilanzierung auf. So können bereits an dieser Stelle die mineralisierten N-Mengen Rückschlüsse auf eine negative Humusbilanz (Tabelle 20) geben.

Obwohl für die Region West ein Viehbesatz von 0,95 GV ha<sup>-1</sup> ermittelt wurde, geht aus Tabelle 18 hervor, dass vergleichsweise weniger Stickstoff aus dem Einsatz organischer Düngemittel zur Verfügung gestellt wird. In den Projektbetrieben werden Teile der Wirtschaftsdünger aus dem Betrieb exportiert und anderen Betrieben/Unternehmen zur Verwertung übergeben.

Anhand der Nährstoffverwertung lassen sich Hinweise auf einen effizienten Einsatz des Stickstoffs geben. So werden zwischen 72 % (Nord) und 81 % (Süd, West) des eingesetzten Nährstoffs in Ertrag umgesetzt.

Die in Tabelle 19 dargestellten Ergebnisse des Phosphorsaldos für die vier Projektregionen weisen auf eine unterschiedlich starke Versorgung des Ackerlandes mit dem Nährstoff Phosphor hin.

**Tabelle 19: P-Saldo in kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet)**

Bilanzgröße	Einheit	Nord	Ost	Süd	West
Nährstoffentzug ges.	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	96	78	101	87
Saat-/Pflanzgut	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	1	1	1	1
Organische Düngung ges.	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	94	37	37	37
<i>Strohdüngung</i>	<i>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></i>	<i>14</i>	<i>9</i>	<i>16</i>	<i>14</i>
<i>Gründüngung</i>	<i>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></i>	<i>12</i>	<i>5</i>	<i>16</i>	<i>11</i>
<i>Stalldung</i>	<i>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></i>	<i>0</i>	<i>7</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Gülle</i>	<i>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></i>	<i>55</i>	<i>9</i>	<i>2</i>	<i>5</i>
<i>Jauche</i>	<i>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Sonstige</i>	<i>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></i>	<i>13</i>	<i>7</i>	<i>2</i>	<i>7</i>
Mineraldünger ges.	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	16	25	43	21
Nährstoffzufuhr ges.	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup>	112	64	80	57
<b>NÄHRSTOFFSALDO</b>	<b>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></b>	<b>16</b>	<b>-16</b>	<b>-20</b>	<b>-35</b>
<b>Nährstoffsaldo mit Korrektur</b>	<b>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></b>	<b>31</b>	<b>-29</b>	<b>-25</b>	<b>-45</b>

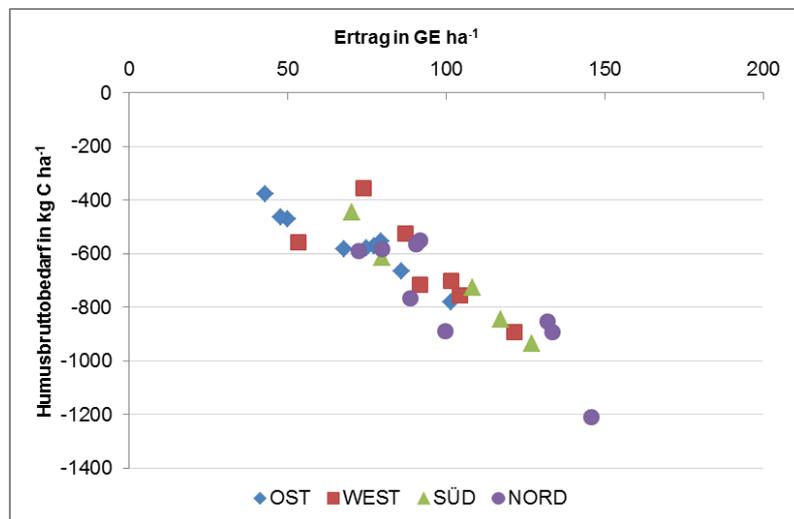
So kann einzig für die Region Nord ein positiver Phosphorsaldo berechnet werden. Dieser spiegelt zum einen die gute Nährstoffversorgung der Schläge aufgrund eines guten Düngemanagements wider. Zum anderen sind die Schläge aufgrund der ausgeprägten Tierhaltung und damit dem kontinuierlichen Anfall organischer Düngemittel von Grund auf besser versorgt. Demgegenüber wurde für alle anderen Regionen ein Defizit hinsichtlich der Phosphorversorgung festgestellt. Demnach konnten geeignete Düngemaßnahmen während der gesamten Vegetationsphase den Bedarf nicht decken, sodass der benötigte Phosphor aus dem Bodenvorrat mobilisiert werden musste. Dieser Sachverhalt lässt sich ebenfalls mit Hilfe des korrigierten Phosphorsaldos darstellen, indem der berechnete Phosphorsaldo anhand der Bodengehaltsklassen schlagspezifisch korrigiert wird. Daraufhin ist sowohl für die Region Ost als auch Süd und West ein noch stärkeres Defizit nachweisbar. Womöglich steht die Phosphordüngung aufgrund wirtschaftlicher Rahmenbedingungen nicht im Vordergrund, sodass eine nachhaltige Nährstoffversorgung im Betrachtungszeitraum in den Hintergrund rückt. Abschließend geben die hier vorliegenden Phosphorsalden (mit Korrektur) Hinweise auf eine potenzielle Unterversorgung der Flächen im Mittel aller Projektbetriebe der Regionen Ost, Süd und West.

Die in Tabelle 20 aufgeführten Ergebnisse der dynamischen Humusbilanz geben Aufschluss über die Quantität und Qualität der Bewirtschaftung hinsichtlich eines wichtigen Aspektes der Bodenfruchtbarkeit und deren nachhaltiger Erhaltung.

**Tabelle 20: Humusbilanz (dynamisch) in kg C ha<sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet)**

Bilanzgröße	Einheit	Nord	Ost	Süd	West
Humusbruttobedarf	kg C ha <sup>-1</sup>	-741	-561	-698	-643
Humusmehrerleistung	kg C ha <sup>-1</sup>	22	30	22	13
Saat-/Pflanzgut	kg C ha <sup>-1</sup>	0	0	0	0
Strohdüngung	kg C ha <sup>-1</sup>	344	250	375	359
Gründüngung	kg C ha <sup>-1</sup>	86	32	101	68
Organische Düngung ges.	kg C ha <sup>-1</sup>	183	169	28	50
Stalldung	kg C ha <sup>-1</sup>	0	83	1	2
Gülle	kg C ha <sup>-1</sup>	120	47	5	22
Sonstige	kg C ha <sup>-1</sup>	63	38	21	26
Humusersatzleistung ges.	kg C ha <sup>-1</sup>	635	481	526	490
<b>HUMUSSALDO</b>	<b>kg C ha<sup>-1</sup></b>	<b>-106</b>	<b>-79</b>	<b>-173</b>	<b>-152</b>

Nach abschließenden Berechnungen ergibt sich je nach Höhe des Saldos die folgende Aufreihung: Ost > Nord > West > Süd. Bei genauerer Betrachtung ergeben sich bereits im Humusbruttobedarf gravierende Unterschiede zwischen den Projektregionen. Jedoch liefert der Bedarf allein keine Aussagen zum Saldo, viel mehr entscheidet die zugeführte Menge an Kohlenstoff über die Höhe des Humussaldos. In der Region Ost können bereits 85 % über die Humusersatzleistungen gedeckt werden. Diese setzen sich vorwiegend über das Einarbeiten von Stroh- und Grünmasse (60 %) und aus dem Einsatz von humuswirksamen Wirtschaftsdüngern (rund 35 %) zusammen. Der vergleichsweise geringe Bedarf resultiert dabei hauptsächlich aus den weniger hackfruchtintensiven Fruchtfolgen der Region. So können mit dem fokussierten Einsatz der organischen Düngemittel nicht nur Nährstoffkreisläufe geschlossen, sondern auch die Bodenfruchtbarkeit mit einem guten Nährstoffhaltevermögen gefördert werden. Die Region Nord ist durch den höchsten Humusbruttobedarf gekennzeichnet, welcher auf ein hohes Ertragspotenzial in der Region zurückzuführen ist (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Darstellung des Zusammenhanges zwischen Humusbruttobedarf in kg C ha<sup>-1</sup> und Ertrag in GE ha<sup>-1</sup>**

Einhergehend mit der Stickstoff- und Phosphorbilanz ist an dieser Stelle der Anteil der organischen Düngung an den Humusersatzleistungen ebenfalls hoch. Durch den Anfall und Einsatz tierischer Exkremate, bevorzugt von Gülle, werden dem Boden nicht nur Nährstoffe sondern auch Kohlenstoffverbindungen zugeführt, die humuswirksam sind. Zusätzlich beeinflussen die hohen Anteile der Stroh- und Gründüngung die Humusbilanz positiv. Trotz allem verweist der negative Bilanzsaldo auf einen starken Humusabbau, der nur unzureichend durch Ersatzleistungen ausgeglichen werden kann.

Der für die Region West errechnete stärkste negative Saldo ergibt sich aus dem Zusammenspiel vieler Einflussfaktoren. So wird der vergleichsweise hohe Bedarf an Kohlenstoff durch den Anbau von ertragreichen Zuckerrüben und Mais auf den Flächen bestimmt. Trotz des Anbaus von Zwischenfrüchten vor den Hackfrüchten geht deren Anteil nur mit rund 10 % in die Ersatzleistungen ein. Selbst der Getreideanbau auf 58 % der Flächen kann den Humusbruttobedarf durch die Rückführung des Strohs nicht ausreichend decken. Weiterhin werden in Anlehnung an den Phosphorsaldo tierische Exkremate sehr moderat eingesetzt, sodass der vergleichsweise geringe Anteil auch einen geringfügigen Anteil an humuswirksamen Kohlenstoff zur Verfügung stellt. Wie schon aus Tabelle 17 hervorgeht kennzeichnet sich die Region Süd durch die niedrigste Viehbesatzdichte im regionalen Vergleich. So werden die wenigen vorhandenen organischen Dünger vorwiegend als Gärreste (unter sonstigen organischen Düngemitteln) eingesetzt und tragen mit knapp 30 kg C ha<sup>-1</sup> zu den Humusersatzleistungen bei. Der Hauptteil der Kohlenstoffzufuhr wird über die Einarbeitung von Stroh- und Gründüngung realisiert.

#### 5.4.2 Pflanzenschutzintensität

Die in Tabelle 21 zusammengefassten Behandlungsindices der einzelnen Hauptkulturen der vier Projektregionen zeigen verschiedene Pflanzenschutzstrategien in den landwirtschaftlichen Projektbetrieben der Regionen auf (Nord > Süd > West > Ost). Diese Tatsache lässt sich einerseits auf unterschiedliche Intensitäten im Anbau, aber hauptsächlich auf klimatische Gegebenheiten zurückführen. Die Daten geben aber keine Hinweise auf den mengenmäßigen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in den Betrieben.

**Tabelle 21: Behandlungsindices der wichtigsten Hauptfrüchte (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen)**

Hauptfrucht	Behandlungsindices			
	Nord	Ost	Süd	West
Winterweizen	6,6	4,6	4,6	4,3
Wintergerste	3,8	3,7	3,6	3,3
Winterroggen	4,2	3,0	1,4	4,1
Triticale	4,6	1,9	1,7	2,2
Sommergerste	4,2	3,0	4,1	2,9
Hafer	6,3	2,1	0,7	3,0
Raps	6,6	5,9	7,6	6,8
Zuckerrübe	7,9	6,8	5,2	6,1
Kartoffel	19,1	10,5	7,1	n.i.A.*
Mais	2,3	1,6	1,5	1,4

\* nicht im Anbau

Da Pflanzenschutz ein wichtiges Instrument zur Absicherung von Erträgen ist, wird in Abbildung 9 der aufgewendete Pflanzenschutz in Bezug zum Ertragsniveau gesetzt. Dabei ist zum einen der Energieeinsatz stellvertretend für die Höhe an Wirkstoffmengen, zum anderen der Nährstoffentzug von Stickstoff als ertragsrelevanter Parameter abgetragen.

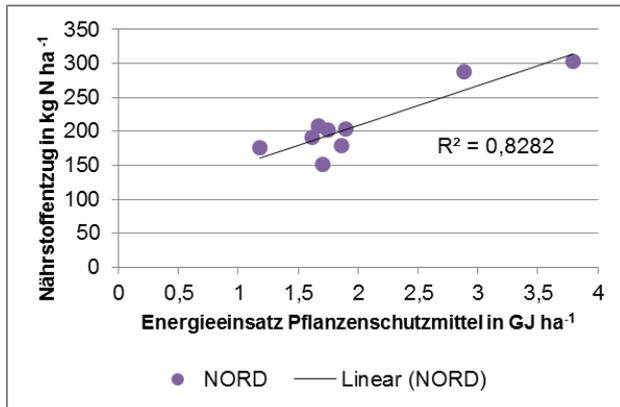


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen Nährstoffezug in kg N ha<sup>-1</sup> und dem Energieeinsatz von Pflanzenschutzmitteln in GJ ha<sup>-1</sup> für die Projektregion Nord

Es zeigt sich, dass bei steigendem Nährstoffezug der Energieeinsatz von Pflanzenschutzmitteln linear ansteigt, sprich eine direkte Abhängigkeit zwischen beiden Faktoren besteht. Dieses wird durch einen Korrelationskoeffizienten in Höhe von 0,8 verdeutlicht. Aufgrund dessen kann in der Region Nord ein effizienter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln nachgewiesen werden, da Erträge mittels Pflanzenschutz abgesichert werden müssen.

Für die übrigen Regionen ist dieser Sachverhalt in Abbildung 10 dargestellt. Aufgrund der fehlenden statistischen Abhängigkeit ( $R^2 \leq 0,58$ ) lässt sich schlussfolgern, dass die Pflanzenschutzstrategien der einzelnen Projektbetriebe hinsichtlich der Stickstoffausnutzung über die Ertragsbildung noch nicht optimiert sind. An dieser Stelle ist jedoch darauf hinzuweisen, dass diese Aussagen nicht auf eventuelle Umweltwirkungen schließen lassen. Es kann zwar der Pflanzenschutz reduziert werden, aber auch ein Mehr an Pflanzenschutz kann zu einer besseren Ausnutzung des Stickstoffs führen.

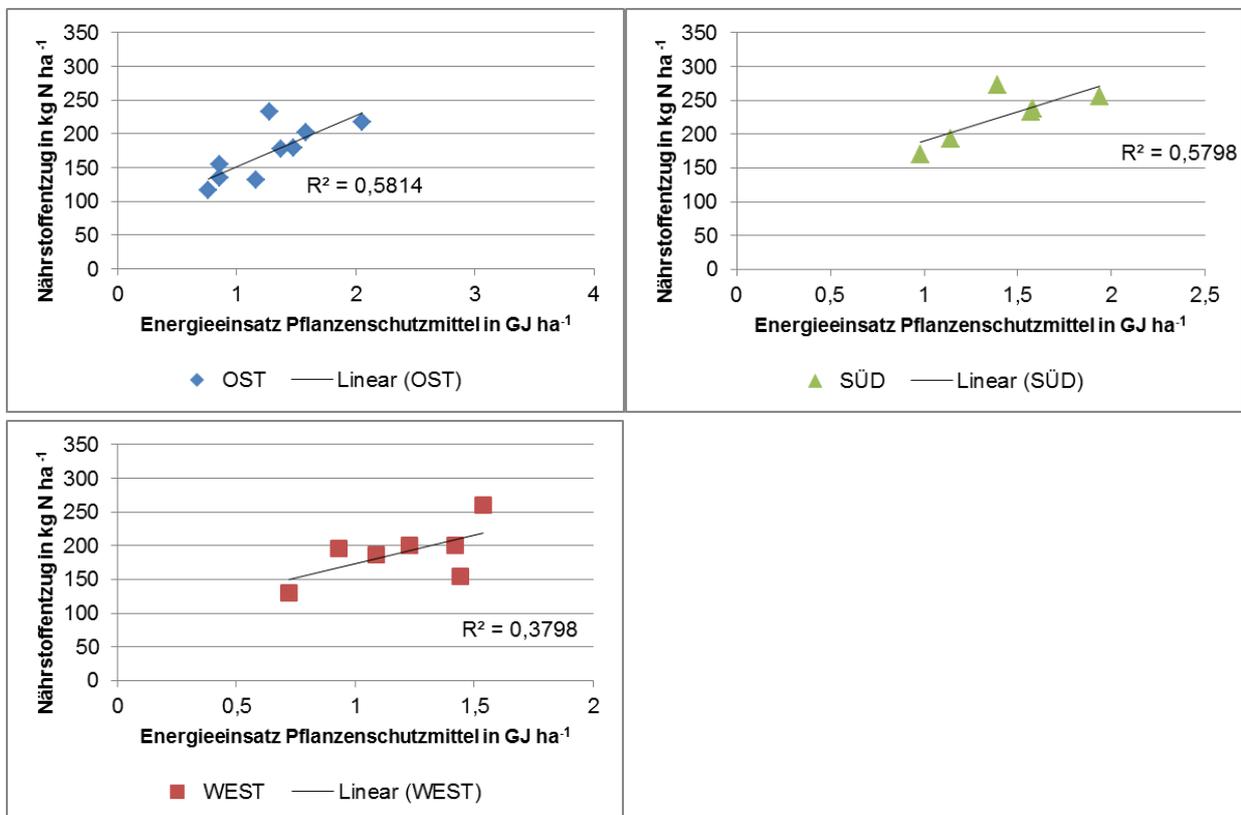


Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Nährstoffezug in kg N ha<sup>-1</sup> und dem Energieeinsatz von Pflanzenschutzmitteln in GJ ha<sup>-1</sup> für die Projektregionen Ost, Süd, West

### 5.4.3 Energie- und Treibhausgasbilanz

**Tabelle 22: Energiebilanz in MJ GE<sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet)**

Bilanzglieder	Einheit	Nord	Ost	Süd	West
Ertrag HP + NP	GE ha <sup>-1</sup>	99	70	102	90
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	16	14	16	14
<i>Org. Dünger ges.</i>	<i>GJ ha<sup>-1</sup></i>	4	1	0 (0,2)	1
<i>Mineraldünger ges.</i>	<i>GJ ha<sup>-1</sup></i>	5	5	7	6
<i>Saatgut ges.</i>	<i>GJ ha<sup>-1</sup></i>	3	2	3	2
<i>Pflanzenschutzmittel ges.</i>	<i>GJ ha<sup>-1</sup></i>	2	1	1	1
<i>Dieselmotoren ges.</i>	<i>GJ ha<sup>-1</sup></i>	3	3	4	3
<i>Maschinen und Geräte ges.</i>	<i>GJ ha<sup>-1</sup></i>	1	1	1	1
Energie-Output	GJ ha <sup>-1</sup>	160	138	164	148
Energie-Gewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	145	126	150	135
<b>Energie-Intensität</b>	<b>MJ GE<sup>-1</sup></b>	<b>165</b>	<b>187</b>	<b>147</b>	<b>144</b>
Output/Input-Verhältnis		10	11	11	12

Je nach Höhe der Energieintensität ergibt sich folgende Aufreihung der Regionen: West > Süd > Nord > Ost. Der für die Region West bezeichnende niedrigste Einsatz fossiler Energie führt in Kombination mit dem hohen Ertragsniveau zur besten Energieintensität. Aufgrund des angepassten Einsatzes der Betriebsmittel an die regionalen Ertragserwartungen ergibt sich eine energetisch effiziente Produktion, die über das Output/Input-Verhältnis beschrieben wird. In Anlehnung an die Stickstoff- und Phosphorbilanz erfolgt in der Region Süd aufgrund der geringen Viehbesatzdichte die Nährstoffzufuhr eher über den Einsatz von mineralischen Düngemitteln, der sich in der Energiebilanz, genauer dem Einsatz fossiler Energie, wiederfindet. Der damit verbundene hohe Gesamteinsatz an fossiler Energie kann durch das höchste Ertragsniveau ausgeglichen werden, sodass eine ähnlich geringe Intensität für die Region Süd errechnet werden konnte.

Sowohl für die Region Nord als auch für die Region Ost sind höhere Intensitäten errechnet worden. Trotz des hohen Ertragsniveaus der Region Nord kann die eingesetzte Energie, besonders die der zusätzlich eingesetzten mineralischen Dünger, nicht optimal verwertet werden, weshalb sich im Vergleich ein entsprechend schlechtes Output/Input-Verhältnis ergibt. Weiterhin spiegelt sich der intensivere Pflanzenschutz in einem höheren energetischen Anteil der Pflanzenschutzmittel wider. Im Gegensatz dazu beruht die für die Region Ost ausgewiesene höhere Energieintensität vorwiegend auf dem niedrigeren Ertragsniveau, sodass die eingesetzte fossile Energie nicht effizient bei der Ertragsbildung verwertet werden konnte. Dieser Sachverhalt wird vom Output/Input-Verhältnis bestätigt.

**Tabelle 23: Treibhausgasbilanz in kg CO<sub>2</sub> äq GE<sup>-1</sup> (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen, gerundet)**

Bilanzglieder	Einheit	Nord	Ost	Süd	West
C-Sequestrierung*	kg CO <sub>2</sub> äq ha <sup>-1</sup>	384	292	634	541
CO <sub>2</sub> -Emissionen Anbau	kg CO <sub>2</sub> äq ha <sup>-1</sup>	990	897	1.161	963
N <sub>2</sub> O-Emissionen	kg CO <sub>2</sub> äq ha <sup>-1</sup>	1.299	1.014	1.260	1.049
THG-Emissionen (ha)	kg CO <sub>2</sub> äq ha <sup>-1</sup>	2.673	2.203	3.055	2.553
THG-Emissionen (GJ)	kg CO <sub>2</sub> äq GJ <sup>-1</sup>	16	18	18	17
<b>THG-Emissionen (GE)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> äq GE<sup>-1</sup></b>	<b>27</b>	<b>32</b>	<b>30</b>	<b>28</b>

\* positiver Wert= C- Freisetzung aus dem Boden/ negativer Wert= C-Speicherung im Boden

Hinsichtlich der Klimawirkungen der einzelnen Regionen sind unterschiedliche Ergebnisse ermittelt worden. So reihen sich die Regionen je nach Höhe der produktbezogenen Emissionen wie folgt auf: Ost > Süd > West > Nord, wobei in der Region Ost die höchsten THG-Emissionen je Produkteinheit ausgewiesen werden. Als wesentlicher Einflussfaktor wird an dieser Stelle das regionale Ertragsniveau herausgestellt (siehe Tabelle 22). Je höher der realisierte Ertrag bei gleichbleibenden Inputs ist, desto besser werden die produktbezogenen THG-Emissionen. Ein weiterer Baustein der Treibhausgasbilanzierung ist die C-Sequestrierung, die den Bezug zur Humusbilanz herstellt. Das aus dem Humusabbau freigesetzte CO<sub>2</sub> fällt dabei unterschiedlich hoch aus.

Weiterhin werden die Emissionen, die aus dem Anbau resultieren, sowie die umgerechneten N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der Stickstoffzufuhr berücksichtigt. Der für die Regionen Nord und Süd errechnete hohe Anteil dieser Emissionen stammt aus dem vergleichsweise hohen Einsatz von organischen, wie auch mineralischen Düngemitteln.

#### 5.4.4 Bodenschadverdichtung und Erosion durch Wasser

**Tabelle 24: Schadverdichtungsgefährdung des krumennahen Unterbodens (35 cm) als Index (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen)**

Bilanzglieder bzw. Verfahrensabschnitt	Nord	Ost	Süd	West
Bodenbearbeitung	0,10	0,14	0,08	0,12
Bestellung	0,02	0,04	0,02	0,03
Min. Düngung	0,12	0,12	0,06	0,11
Org. Düngung	0,14	0,11	0,00	0,07
Pflanzenschutz	0,03	0,05	0,04	0,03
Ernte HP	0,10	0,08	0,12	0,13
<b>Verdichtungsgefährdung</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>0,07</b>	<b>0,10</b>

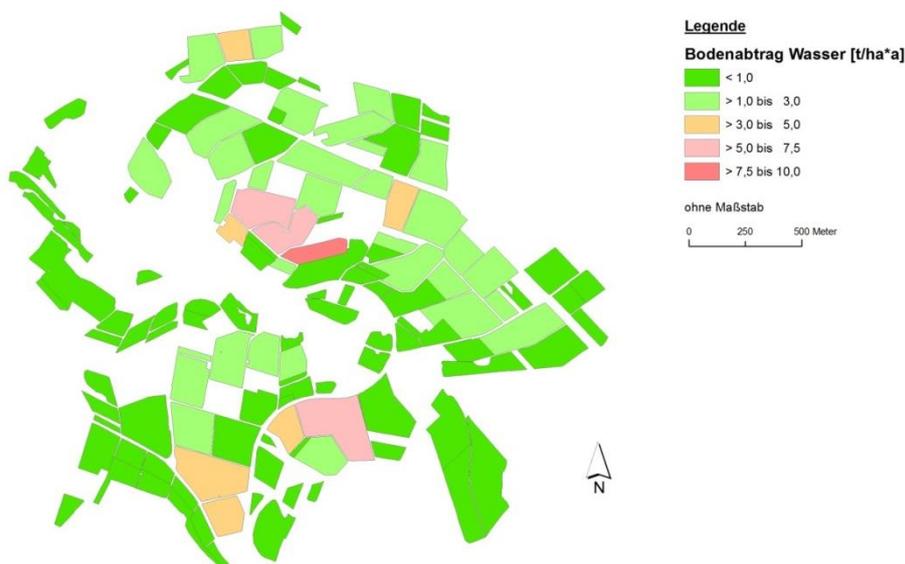
Je nach Höhe der Verdichtungsgefährdung ergibt sich folgende Reihenfolge: Süd > Nord – Ost – West. Die niedrigste Verdichtungsgefährdung der Region Süd resultiert aus den vergleichsweise geringen Indices (< 0,10) über alle Verfahrensabschnitte. Insbesondere die organische Düngung stellt mit einem Index von 0,00 keine Gefährdung dar. Im Gegensatz dazu stellt die Ernte des Hauptproduktes (HP) die größte Schadverdichtungsgefährdung dar. Aufgrund von hackfruchtintensiven Fruchtfolgen kommt es zum Einsatz spezifischer Erntetechniken, welche in der Regel über hohe Achslasten verfügen. Zudem erfolgt bspw. die Rübenernte bis in den November hinein. Da dieser Monat aufgrund der Witterungsverhältnisse durch eine höhere Bodenfeuchte gekennzeichnet ist, wirkt sich dies auch auf die Befahrbarkeit der Flächen aus. Im

weiteren Vergleich lässt sich die für die Region Nord ermittelte mittlere Verdichtungsgefährdung von dem hohen Anteil der organischen Düngung ableiten. Diese wird allerdings nicht allein durch die Anzahl der Überfahrten bestimmt, sondern auch durch die Dimensionierung der Ausbringtechnik. So führen hohe Achslasten infolge großer Füllvolumina wie auch hohe Reifeninnendrucke zu einer stärkeren Druckbelastung der Böden. Zwar ist für die Region Ost genau die gleiche Verdichtungsgefährdung festgestellt worden, jedoch wird diese von anderen Verfahrensabschnitten bestimmt. Demnach beeinflusst die Bodenbearbeitung entscheidend das Gesamtrisiko. Aufgrund der größeren Betriebsstrukturen in der Region Ost ist eine größere Schlagkräftigkeit von Nöten, um alle Arbeiten termingegenau erledigen zu können. Da diese auch größere Maschinen bedingt, steigen die Radlasten dieser Maschinen. Folglich wird der Druck im Boden während der Überfahrt erhöht. Gepaart mit hohen Reifeninnendrucke der Zugmaschinen kann dieser zusätzlich gesteigert werden. Für die Region West beeinflusst ebenfalls die Ernte entscheidend den Gesamtindex.

Für alle Regionen scheint der Abwägungsprozess hinsichtlich der Befahrbarkeit und der termingerechten Aberntung der Flächen schwierig zu sein, weshalb die Flächen unter Umständen auch bei ungünstigen Bodenverhältnissen befahren wurden.

Der jährliche Bodenabtrag fällt für die einzelnen Regionen differenziert aus. So ist für die Region West der höchste Abtrag mit  $0,98 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  errechnet worden. Für die übrigen Regionen ergibt sich ein Bodenabtrag von  $0,83 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Süd)  $> 0,56 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Ost)  $> 0,43 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Nord). Da in der Regel nicht der gesamte Betrieb erosionsgefährdet ist, sondern nur einzelne Schläge bzw. einzelne sogenannte Erosionspunkte innerhalb der Schläge, hat der jährliche Bodenabtrag einer Projektregion wenig Aussagegehalt. Er kann lediglich Tendenzen zwischen den Regionen aufzeigen.

Der oben genannte Sachverhalt ist in Abbildung 11 nochmals grafisch für einen Projektbetrieb dargestellt.



**Abbildung 11: Grafischer Darstellung des Bodenabtrages in  $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  eines Projektbetriebes**

Daraus geht hervor, dass nicht alle Schläge des Betriebes erosionsgefährdet sind, sondern auf einzelnen Schlägen mit höheren Bodenabträgen  $\geq 7,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  zu rechnen ist. Wie bereits in Kapitel 4.8 beschrieben, entscheidet das Zusammenwirken von Niederschlagsmengen, Bedeckungsgrad sowie die Lage der Flächen im Gelände über die Höhe der Bodenerosion.

### 5.4.5 Biodiversitätspotenzial

Wie schon aus der Indikatorenbeschreibung hervorgeht, ist der Berechnungsalgorithmus des Biodiversitätspotenzials sehr komplex, weshalb an dieser Stelle nur einzelne Teilindikatoren beleuchtet werden sollen.

**Tabelle 25: Ergebnisse der 11 Teilindikatoren des Biodiversitätspotenzials (3-jähriger Mittelwert der vier Projektregionen)**

Bilanzglieder		Einheit	Nord	Ost	Süd	West
STRUKTUREN	Sortendiversität		2,71	3,79	2,14	2,08
	Fruchtartendiversität		1,39	2,01	1,35	0,80
	Fruchtgruppendifersität		1,16	1,46	1,29	1,19
	Nutzungsdiversität		0,08	0,28	0,09	0,26
	Nutzungs-/Anbaudiversität		0,93	1,33	0,91	0,83
	mittlere Randlänge	100m	13,18	25,15	8,58	8,87
	mittlere Teilschlaggröße	ha	7,13	11,12	4,34	2,46
	Variationskoeffizient Teilschlaggröße	%	88,62	129,41	83,84	90,38
INPUTS	Anteil der landw. Fläche ohne PSM	%	2,18	13,98	2,28	9,43
	Behandlungsindex bewertet		0,12	0,38	0,25	0,41
	Düngungsintensität (Stickstoff)	kg ha <sup>-1</sup>	171,85	142,05	178,03	144,11
MAßNAHMEN	Verfahrensdiversität Bodenbearbeitung - AL		0,26	0,23	0,28	0,34
	Verfahrensdiversität Ernte		0,18	0,12	0,20	0,19
	Nutzungshäufigkeit Grünland + Ackerfutter	Anzahl Jahr <sup>-1</sup>	0,65	2,15	0,45	1,02
	Überrollhäufigkeit	Anzahl Jahr <sup>-1</sup>	12,09	12,76	12,80	11,12

Hinsichtlich der Strukturen kennzeichnet sich die Region Ost durch eine vergleichsweise höhere Nutzungs-/Anbaudiversität, welche auf eine höhere Fruchtarten- und Fruchtgruppendifersität zurückzuführen ist. Einhergehend mit einer größeren durchschnittlichen Teilschlaggröße in dieser Region stellen die vergleichsweise doppelt so hohen Randlängen das größte Potenzial innerhalb der Strukturen dar. Weiterführend werden die Inputs betrachtet. Resultierend aus dem hohen Grünlandanteil der Region Ost wird an dieser Stelle aufgezeigt, dass der Anteil der Flächen, die nicht chemisch-synthetisch behandelt werden, am höchsten ist. Die Behandlung der übrigen Flächen geht als Behandlungsindex gesamt in die Berechnung ein, jedoch als Bewertung, die erst im nachfolgenden Kapitel 6.9 besprochen werden soll. Hinsichtlich der Düngungsintensität ergibt sich ein anderes Bild im Vergleich der Regionen. In Anlehnung an die Stickstoffbilanzierung (vgl. Abschnitt 5.2.1) konnten auch hier die höchsten Intensitäten mit über 170 kg ha<sup>-1</sup> für die Regionen Nord und Süd ermittelt werden.

Die letzte Gruppe der Maßnahmen spiegelt die Verfahrensdiversität innerhalb der Betriebe/Regionen wider. Entscheidende Differenzen können dabei für die Nutzungshäufigkeit von Grünland und Ackerfutter in der Region Ost ausgemacht werden. Aufgrund eines höheren Anteils an Grünland in dieser Region resultiert eine höhere Nutzungshäufigkeit, die zu Störungen des Ökosystems führen kann. Am Ende werden alle Maßnahmen über den Produktionsablauf nochmals in dem Teilindikator Überrollhäufigkeit als Anzahl pro Jahr zusammengefasst. Weniger Überfahrten bedeuten weniger Störungen des Systems, daraus ergibt sich folgende Rangordnung West > Nord > Ost > Süd in diesem Teilaspekt des Biodiversitätspotentials.

## 6 Bewertung der Ergebnisse

Nach der Berechnung der Ist-Werte erfolgte die Beurteilung der Betriebswerte hinsichtlich der Erfüllung von definierten Nachhaltigkeitszielen. Ob ein Indikatorwert als nachhaltig oder nicht nachhaltig eingestuft werden kann, bedarf geeigneter Bewertungsfunktionen. Allen berechneten Indikatoren werden Soll- bzw. Grenzwerte zugeteilt. Über ein Normalisierungsverfahren werden die Indikatoren in dimensionslose Werte zwischen 0 und 1 überführt und anhand einer Bewertungsfunktion der Nachhaltigkeitsstatus bewertet. Der Betriebswert wird auf einer Skala zwischen 0 und 1 eingeordnet, wobei 0 der ungünstigste Wert und 1 der günstigste Wert hinsichtlich der Nachhaltigkeit ist. Dies ermöglicht, die unterschiedlichen Einzelkriterien zu aggregieren und eine betriebliche Gesamtbewertung anhand des gesamten Sets der neun Indikatoren vorzunehmen.

Für die Bewertung ist für jeden Indikator ein Optimalbereich definiert. Diese Bereiche werden spezifisch in den folgenden Abschnitten dargestellt. Wenn auf betrieblicher Ebene dieser Optimalbereich erreicht wird, erfolgt eine Bewertung von 1,0. Wenn der Indikatorwert außerhalb des definierten Optimums liegt, erfolgt eine Bewertung kleiner 1,0 bis hin zu einer Nullbewertung. In dieser Arbeit wurden die Bewertungsfunktionen an den praxiserprobten DLG-Nachhaltigkeitsstandard angelehnt.

Für die Gesamtbewertung der ökologischen Nachhaltigkeit der Projektbetriebe werden alle Einzelindikatoren gleichgewichtet gemittelt. Dieser Wert wird zur Bewertung der betrieblichen Nachhaltigkeitsleistung herangezogen. Auf der betrieblichen Ebene muss dieser berechnete Wert  $\geq 0,75$  betragen, um von einem nachhaltigen Bewirtschaftungssystem ausgehen zu können. In dieser Herangehensweise ist nach dem Prinzip der schwachen Nachhaltigkeit ein Ausgleich zwischen den Einzelindikatoren möglich.

## 6.1 Stickstoffbilanz

Für die Bewertung der betrieblichen Stickstoffsalden wurde die in Abbildung 12 dargestellte Bewertungsfunktion verwendet. Als optimaler Zustand im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung ist der Bereich zwischen 0 bis 50 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> definiert. N-Verluste in dieser Höhe sind nie vollständig zu vermeiden, denn bis zu einer Höhe von 50 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> werden durch die Bewirtschaftung keine gravierenden ökologischen Schäden hervorgerufen. In der Literatur werden als einzuhaltende N-Salden 25 bis 50 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> angegeben (FREDE & DABBERT 1998), wobei dies nur Anhaltspunkte sein können, da die unterstellten N-Bilanzmethoden vom verwendeten REPRO-Ansatz abweichen.

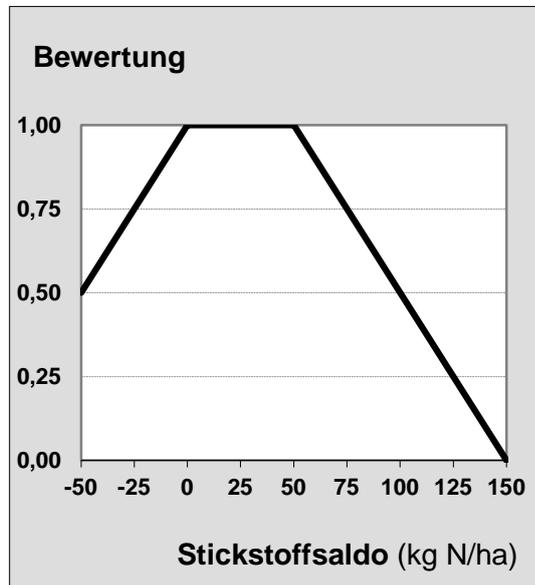


Abbildung 12: Bewertungsfunktion Stickstoffsaldo

Weiterhin wird unterstellt, dass sowohl mit Über- als auch Unterschreiten des optimalen Wertebereiches eine nicht nachhaltige Bewirtschaftung eintritt. Bei langjährig negativen N-Salden ist eine Abnahme der Boden-N-Vorräte zu erwarten, was letztlich zur Verminderung der Ertragsfähigkeit der Böden führt. Mit steigenden N-Salden steigt die Gefahr der Verluste an reaktiven N-Verbindungen. Bei der Festlegung der noch tolerierbaren N-Verluste wurden gleichermaßen die Umweltwirkungen (kritische Eintragsraten und -frachten), die ökonomischen Effekte (Ertrags- und Gewinnänderungen) sowie die Umsetzbarkeit (Ausgangssituation der Betriebe, N-Einsparpotential) beachtet.

Auf betrieblicher Ebene führen die berechneten 3-jährigen Stickstoffsalden zu Bewertungen von 0,00 bis 1,00 (Abbildung 13). Im Mittel der Projektbetriebe wird eine gute Bewertung von 0,78 erreicht.

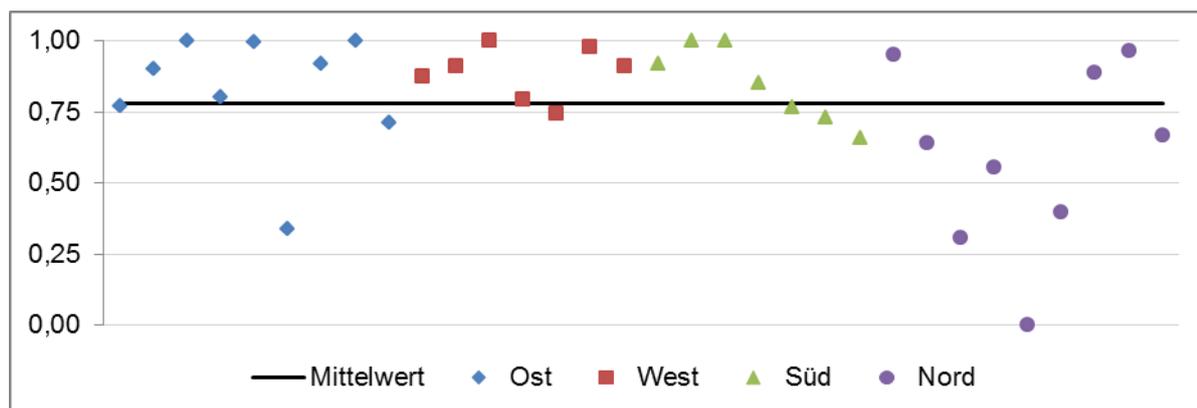


Abbildung 13: Bewertung der betrieblichen Stickstoffsalden (32 Projektbetriebe)

## 6.2 Phosphorbilanz

Phosphor gehört zu den Nährstoffen, die langfristig fest im Boden gespeichert werden. Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden in Verbindung mit dem ertragsabhängigen Entzug entscheidet

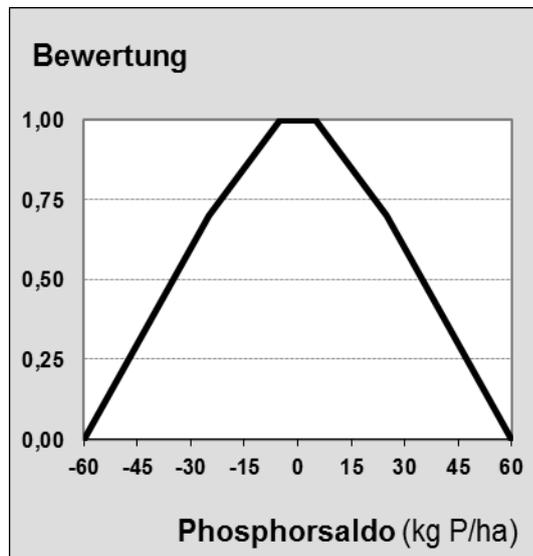


Abbildung 14: Bewertungsfunktion Phosphorsaldo

über die Höhe der Düngung. Bei der P-Bilanz errechnete Salden sind daher ohne Berücksichtigung der Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden keine geeignete Grundlage für eine Bewertung des Düngemanagements. Wie in Kapitel 4.2 dargestellt, werden die Gehalte an pflanzenverfügbarem P im Boden als Zu- bzw. Abschläge zur P-Bilanz berücksichtigt. Die Verknüpfung beider Werte führt zu einem korrigierten P-Saldo, welcher einer Bewertung des Düngemanagements unterzogen wird.

Die Anwendung des korrigierten P-Saldos erlaubt die Bewertung des P-Haushaltes bei unterschiedlichen Bodengehaltsklassen anhand der gleichen Bewertungskurve. In Abbildung 14 ist die Bewertungsfunktion dargestellt. Im Unterschied zu den Ergebnissen erfolgt die Bewertung anhand von P und nicht von  $P_2O_5$ . Es wird ein optimaler Bereich von  $-5 \text{ kg P ha}^{-1}$  bis  $5 \text{ kg P ha}^{-1}$  definiert, welcher die Bewertung 1,00 erhält. In diesem Bereich entspricht

der Phosphorsaldo den Forderungen nach einer wirtschaftlichen und umweltschonenden Nährstoffversorgung. Die Bewertungskurve schneidet die X-Achse bei  $-60 \text{ kg P ha}^{-1}$  bzw.  $60 \text{ kg P ha}^{-1}$ . Dies sind die ungünstigsten Situationen und werden folglich mit 0,0 bewertet. Um zu einer betrieblichen Gesamtbewertung zu kommen, werden die teilschlagbezogenen Bewertungen, gewichtet nach der Flächengröße, gemittelt. Die guten Phosphorbilanzen der Projektbetriebe spiegeln sich auch in der Bewertung wider. Im Mittel erfolgt eine Bewertung von 0,79. Die einzelbetrieblichen Ergebnisse variieren zwischen 0,15 und 1,00 (vgl. Abbildung 15).

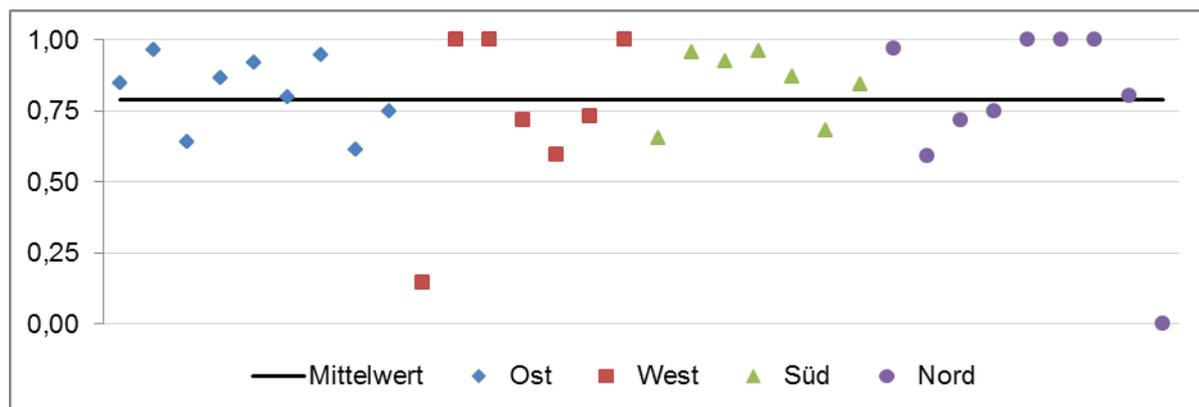


Abbildung 15: Bewertung der betrieblichen Phosphorsalden

## 6.3 Humusbilanz

Die Bewertung der Humusbilanzergebnisse erfolgt anhand von Humus-Saldengruppen angelehnt an den Bewertungsmaßstab der VDLUFA (2004). Als Optimalbereich ist die Gruppe C anzusehen, in dieser ist ein

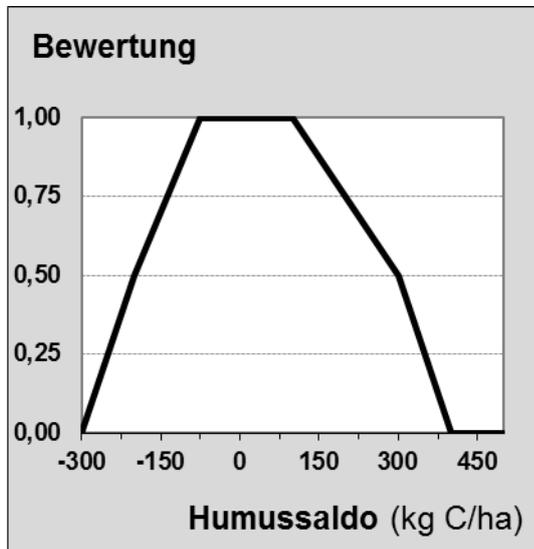


Abbildung 16: Bewertungsfunktion Humussaldo

Wert zwischen  $-75 \text{ kg C ha}^{-1}$  und  $100 \text{ kg C ha}^{-1}$  im dreijährigen Betriebsmittel zu erreichen. Bei Erreichung dieses Saldenbereichs wird eine Bewertung von 1,0 vergeben, da sich in dieser Gruppe standortgerechte Humusgehalte einstellen werden. Die ungünstig bewerteten Gruppen A und E werden demgegenüber mit 0 bewertet. Bei einer Humusunterversorgung der Böden (Gruppe A: Saldo  $\leq 200 \text{ kg Humus-C ha}^{-1}$ ) ist mit einer ungünstigen Beeinflussung der Bodenfunktionen und damit der Ertragsleistungen zu rechnen. Demgegenüber birgt eine starke Überversorgung (Gruppe E: Saldo  $\geq 300 \text{ kg Humus-C ha}^{-1}$ ) das Risiko von Mineralisierungsschüben und somit Stickstoffverlusten. Die Bewertung zwischen 0,00 und 1,00 ist durch die Gruppen B und D gekennzeichnet. In diesen Bereichen sollte mittelfristig eine Überprüfung der bestehenden Humuswirtschaft erfolgen. In Anlehnung an den beschriebenen Bewertungsansatz nach VDLUFA (2004) wird die in

Abbildung 16 dargestellte Funktion für die Bewertung des Indikators verwendet.

Analog zu den Ergebnissen variieren die einzelbetrieblichen Bewertungen der Humusbilanz, wie in Abbildung 17 dargestellt, zwischen 0,00 und 1,00. Im Mittel aller Projektbetriebe wird für diesen Indikator eine Bewertung von 0,63 erreicht.

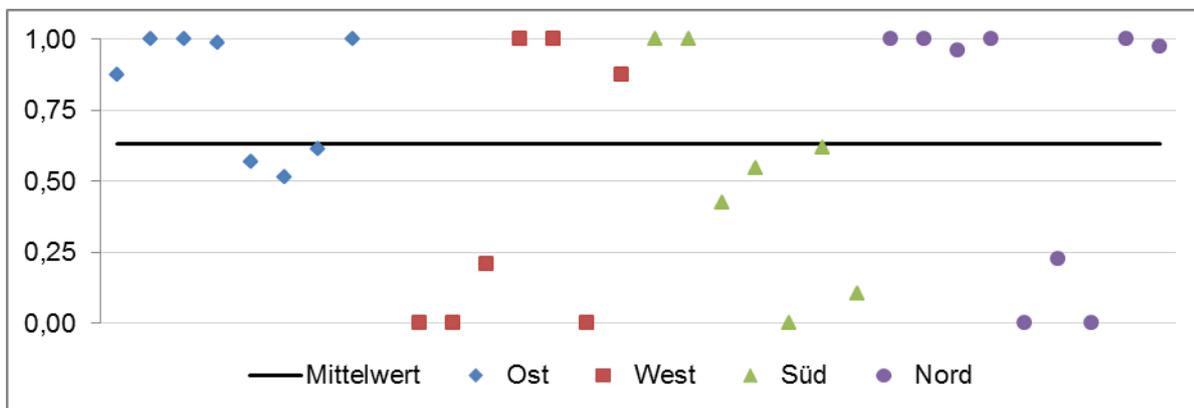
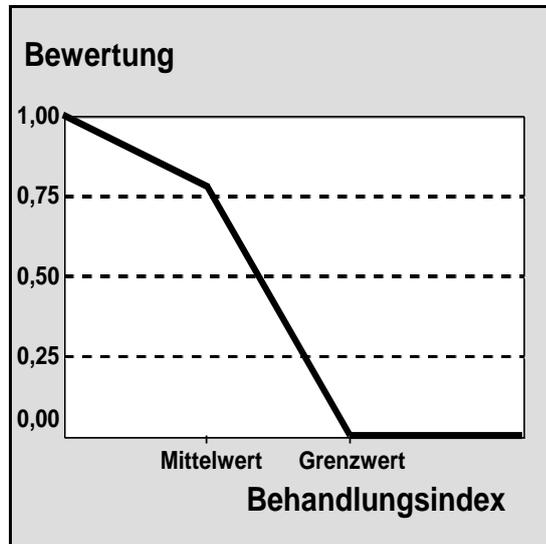


Abbildung 17: Bewertung der betrieblichen Humusbilanzen

## 6.4 Pflanzenschutzintensität

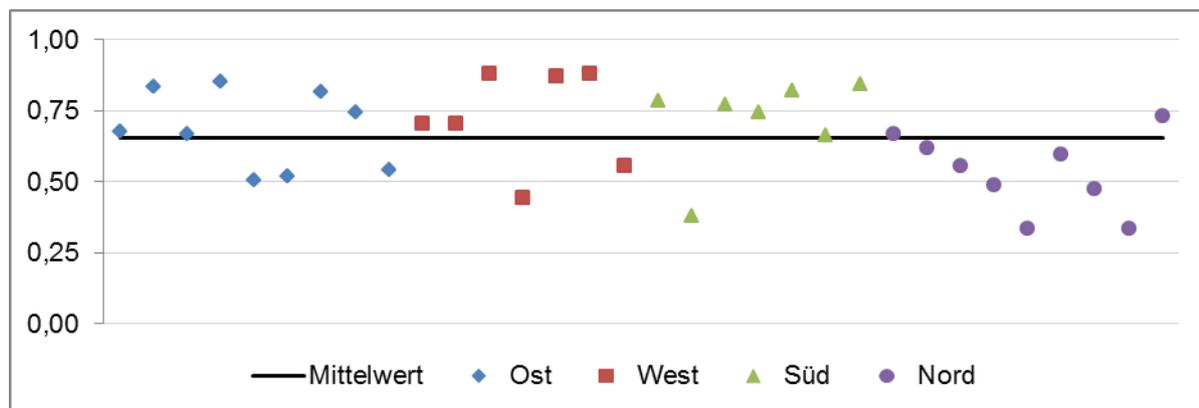
Die Bewertung des Pflanzenschutzes erfolgt auf Ebene der Fruchtarten. Der Soll-Ist-Vergleich wird unter Zuhilfenahme der Datensätze aus dem Netz der „Vergleichsbetriebe Pflanzenschutz“ (FREIER et al. 2015)



**Abbildung 18: Bewertungsfunktion Behandlungsindex**

und den PAPA-Pflanzenschutzanwendungsdaten (ROßBERG 2013) vorgenommen. Die Daten zur PSM- Anwendung werden vom JKI regional und in einer hohen zeitlichen Dichte (jährliche Erhebungen) der Öffentlichkeit als „Behandlungsindices“ mit weiteren statistischen Werten (z.B. Mittelwert, Streuung) bereitgestellt. Damit wird ein Abgleich des „individuellen betrieblichen Pflanzenschutzes“ mit einem „durchschnittlichen Verhalten der Betriebe“ in der Anwendung möglich. Deutlich vom Mittel abweichende Betriebe sind, wenn keine plausiblen Gründe vorliegen, als optimierungswürdig anzusehen. Zur Bewertung wird die in Abbildung 18 dargestellte Funktion verwendet. Der regionale fruchtartenspezifische Mittelwert entspricht einer Bewertung von 0,80.

Für die Einschätzung und zum Verständnis nachfolgender Ergebnisse ist weiterhin anzufügen, dass die vom JKI ermittelten und zum Vergleich herangezogenen Behandlungsindices in den vergangenen Jahren leicht angestiegen sind. Diese Tendenz resultiert aus einem sich über die Zeit verändernden Rahmen in der praktischen Landwirtschaft, d.h. Ertragssteigerungen bei den wichtigsten Kulturpflanzen und die Notwendigkeit diese abzusichern, den steigenden Anteil konservierender Verfahren der Bodenbearbeitung aber auch weiterer Aspekte des wissenschaftlich-technischen Fortschritts wie z.B. dem heute besser möglichen Schutz von Zuckerrüben und Raps vor pilzlichen Schaderregern. Damit sind diese Faktoren im vorliegenden Bewertungsansatz berücksichtigt.



**Abbildung 19: Bewertung der betrieblichen Behandlungsindices**



## 6.6 Treibhausgasbilanzierung

In dieser Arbeit werden die produktionsbedingten CO<sub>2</sub> Emissionen auf die geerntete Getreideeinheit bezogen, um den ernährungsphysiologischen Fußabdruck (Carbon Footprint) darstellen zu können.

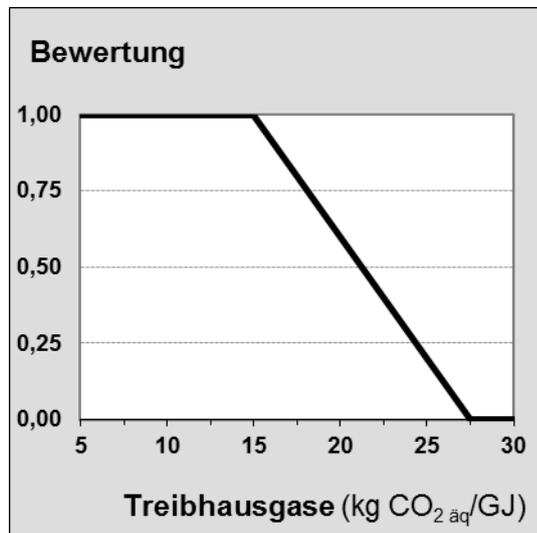


Abbildung 22: Bewertungsfunktion Treibhausgaspotential

Für die Bewertung der Treibhausgasemissionen wird die Bezugseinheit GJ gewählt, welche den energetischen Wert der geernteten Produkte darstellt. Die verwendete Bewertungsfunktion ist in Abbildung 22 aufgeführt. Der Optimalbereich produktionsbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen ist hierbei von 0,0 bis zu 12,5 kg CO<sub>2</sub> je GJ festgelegt. Der nachfolgende Bereich von 12,5 bis 25,0 kg CO<sub>2</sub> je GJ ist im betrieblichen Kontext als abfallend akzeptabel hinsichtlich dieses Indikators zu betrachten. Bei hohen CO<sub>2</sub> Emissionen von mehr als 25 kg CO<sub>2</sub> je GJ handelt es sich um keinen akzeptablen Wert im Sinne der Nachhaltigkeit.

Die Ergebnisse der Projektbetriebe finden sich in der Abbildung 23. Sie variieren zwischen einer Bewertung von 0,00 und 1,00. Im Mittel wird ein guter Wert von 0,80 erreicht.

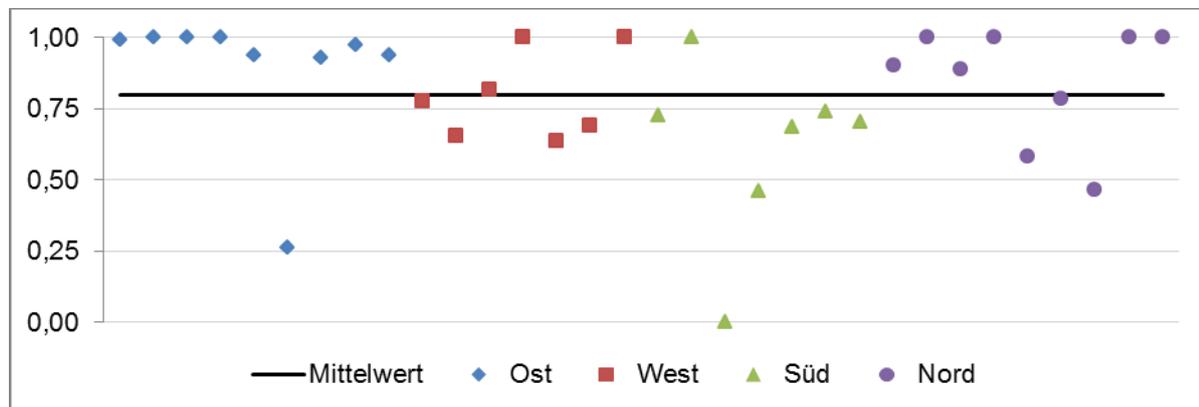
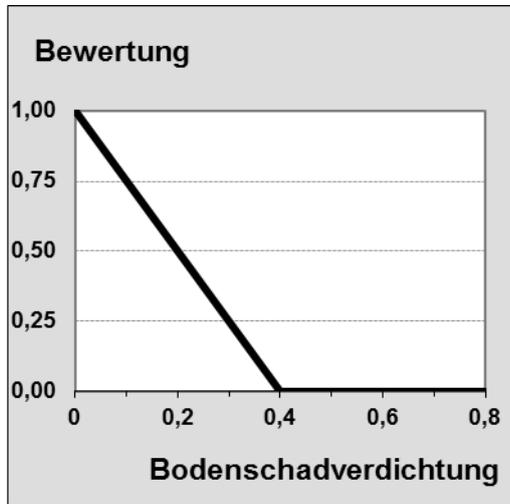


Abbildung 23: Bewertung der betrieblichen Treibhausgasemissionen

## 6.7 Bodenschadverdichtung

Die Bodenschadverdichtung wird als Differenz aus tatsächlichem Bodendruck und Gefügestabilität für jede einzelne Befahrung berechnet. So weisen zunehmende Belastungsindices auf eine steigende Überschreitung der Gefügestabilität hin. Ausgehend vom Teilschlag als kleinste betriebliche Einheit erlaubt die Zusammenfassung der Werte auf betrieblicher Ebene eine komplexe Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung unter den tatsächlichen Bedingungen des Betriebes.



In der Abbildung 24 ist die Bewertungsfunktion dargestellt. Dabei wird bei einem Indexwert von 0,0 von keinem Bodenschadverdichtungsrisiko ausgegangen. Aus diesem Grund wird dieses Ergebnis mit einer 1,00 bewertet. Bis zu einem Indexwert von 0,4 fällt die Bewertungskurve linear ab. Wenn dieser Wert erreicht, bzw. überschritten wird, erfolgt eine Bewertung von 0,00.

Abbildung 24: Bewertungsfunktion Bodenschadverdichtung

Die analysierten Projektbetriebe erreichen im Mittel, wie in Abbildung 25 dargestellt, einen guten Indexwert von 0,77. Die einzelbetrieblichen Werte liegen zwischen 0,30 und 1,00.

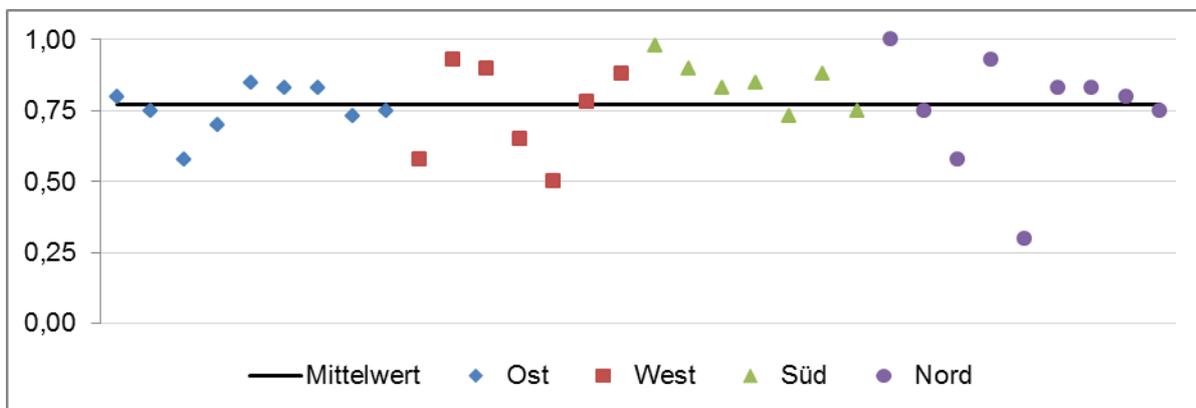
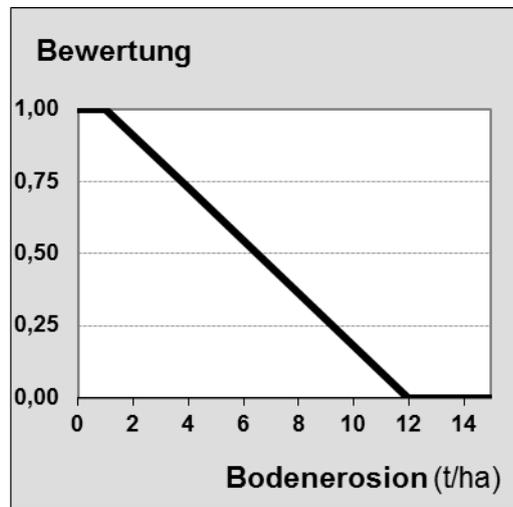


Abbildung 25: Bewertung der betrieblichen Bodenschadverdichtung

## 6.8 Bodenerosion

Die verwendete Funktion zur Bewertung der Bodenerosion ist in Abbildung 26 aufgezeigt. Der Optimalbereich für einen landwirtschaftlichen Betrieb wird bis zu einem mittleren Bodenabtrag von  $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  definiert.



Dem liegen Erfahrungen aus der Praxis zu Grunde, dass durch geeignete Maßnahmen der Bodenabtrag landwirtschaftlich genutzter Flächen selbst in Gebieten mit hohem Erosionspotential auf unter  $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  reduziert werden kann (HUBER et al. 2005).

Aus Sicht des Bodenschutzes wird ein maximaler Bodenabtrag von bis zu  $12,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  für Einzelflächen als akzeptabel angesehen (AUERSWALD et al. 1991). Aufgrund dieser Erkenntnisse fällt die verwendete Bewertungsfunktion für den Gesamtbetrieb von  $1 \text{ t}$  (optimal) bis zu  $12 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (nicht akzeptabel) linear ab.

Abbildung 26: Bewertungsfunktion Bodenerosion

In den analysierten Projektbetrieben war die tatsächlich berechnete, mittlere Bodenerosion relativ gering. Die bewerteten Ergebnisse sind in Abbildung 27 dargestellt. Im Mittel wird ein sehr guter Wert von 0,99 erreicht. Die einzelbetrieblichen Ergebnisse schwanken zwischen 0,75 und 1,00.

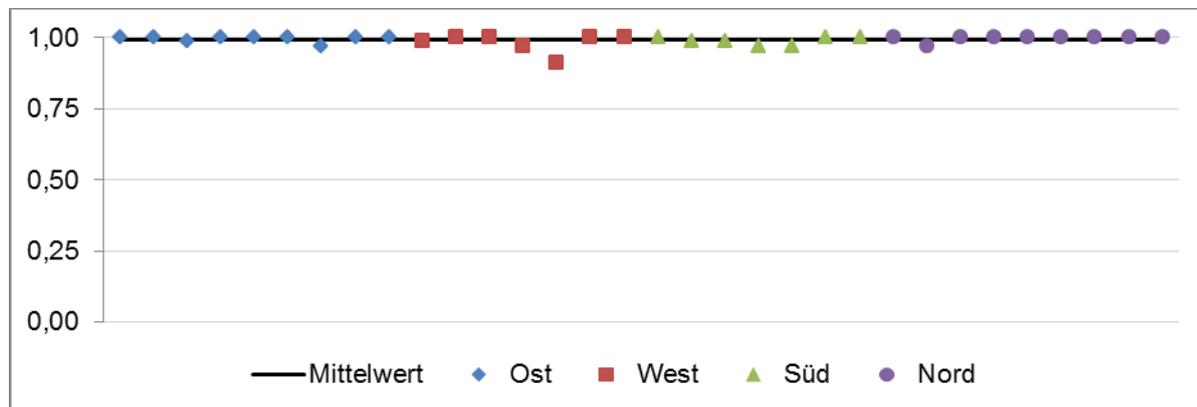


Abbildung 27: Bewertung der betrieblichen Bodenerosion

## 6.9 Biodiversität

Die Bewertung der Biodiversität erfolgt über die 11 dargestellten Teilindikatoren aus den Wirkungsbereichen Strukturen-Inputs-Maßnahmen, wie dies in Kapitel 4.9 veranschaulicht wurde. Im Mittel aller Projektbetriebe, wie in Abbildung 28 dargestellt, wird ein Wert von 0,61 erreicht, wobei die betrieblichen Werte für das Biodiversitätspotential zwischen 0,26 und 1,00 liegen. Somit sind einzelbetriebliche Verbesserungspotentiale nachweisbar.

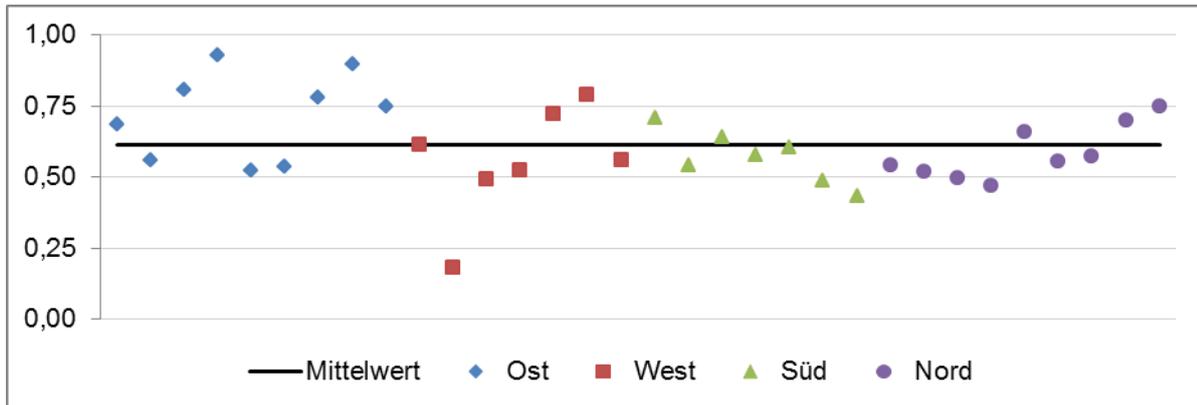
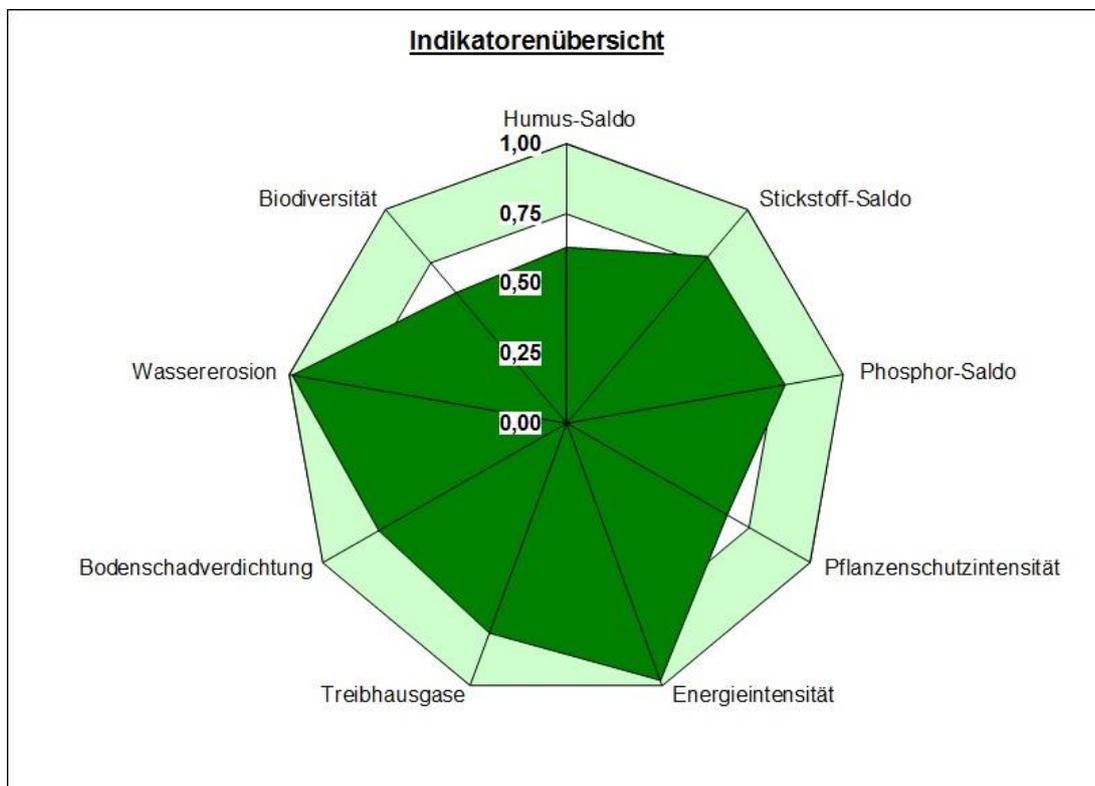


Abbildung 28: Bewertung des betrieblichen Biodiversitätspotentials

## 6.10 Zusammenfassende Bewertung

Für einen abschließenden Gesamtüberblick erfolgt an dieser Stelle eine zusammenfassende Bewertung für den Mittelwert der 32 analysierten Projektbetriebe. Dieser basiert auf den, in den letzten Kapiteln vorgestellten Bewertungsergebnissen der untersuchten Agrarumweltindikatoren. Um eine einfach kommunizierbare Aussage über die Nachhaltigkeitsleistung eines Anbausystems treffen zu können, werden alle bewerteten Indikatorenergebnisse zu einem einzigen Wert verdichtet. Die Einzelindikatoren werden dabei, wie in Kapitel 6 beschrieben, gleich gewichtet gemittelt. Diese Herangehensweise ermöglicht einen objektiven Blick auf die Beanspruchung von Umweltgütern im Zuge der landwirtschaftlichen Produktion.

Für eine einfache Darstellung der Stärken und Schwächen der Flächenbewirtschaftung werden unter Zuhilfenahme der Netzdiagrammtechnik die Mittelwerte aller Ergebnisse in Abbildung 29 aufgezeigt. Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass der Bereich zwischen 0,75 und 1,00 (hellgrün) der definierte Zielbereich für eine nachhaltige Produktion im Sinne der vorgestellten Herangehensweise ist.



**Abbildung 29: Übersicht über die Bewertungen aller Indikatoren**

Wie die Abbildung verdeutlicht, wird der optimale Bereich bei sechs von neun Indikatoren im Mittel aller Projektbetriebe erreicht. Es ist auch erkennbar, dass es für die untersuchten Betriebe Potentiale in den Bereichen Humus, Pflanzenschutz und Biodiversität zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeitsleistung gibt. Der nötige Handlungsbedarf zur Verbesserung in diesen Bereichen sollte möglichst einzelbetrieblich abgeleitet werden, um in der Summe eine Verbesserung im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit zu erreichen.

In dieser durch die VLI initiierten Analyse der ökologischen Nachhaltigkeit deutscher Ackerbaubetriebe konnte im Mittel aller Projektbetriebe ein Ergebnis von 0,78 nachgewiesen werden. Dieser Gesamtwert zeigt, dass die untersuchten 32 Betriebe im Sinne der ökologischen Säule nachhaltig wirtschaften.

# 7 Literaturverzeichnis

AID INFODIENST ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, VERBRAUCHERSCHUTZ e.V. [AID] (2015): Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. 2. Auflage. Bonn.

AUERSWALD et al. (1991): Verwitterung und Bodenbildung als Kriterien des tolerierbaren Bodenabtrags. Landwirtschaftliches Jahrbuch 68. Jahrgang. Heft 5/91: 609-627.

BACH (2014): Regionalisierte Stickstoff-Bilanzen – Ansätze, Datenlage, Ergebnisse. Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement. Vortrag im Rahmen des Fachgespräches „Stickstoffbilanzen in der Landwirtschaft und Umweltschutz“. LANUV NRW am 19.11.2014. Düsseldorf.

[http://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/landwirtschaft/stickstoffbilanzen/Bach-UniGiessen\\_2014-11\\_RegionalisierteStickstoffbilanzen.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/landwirtschaft/stickstoffbilanzen/Bach-UniGiessen_2014-11_RegionalisierteStickstoffbilanzen.pdf) (12.11.2015)

BACH et al. (2011): Berechnung der Stickstoffbilanz für die Landwirtschaft in Deutschland Jahre 1990 – 2008. Handbuch. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut, Nr. 159. Braunschweig.

<http://pub.jki.bund.de/index.php/BerichteJKI/article/download/1425/1756> (11.12.2015)

BASTIAN & SCHREIBER (1999): Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft, 2.Auflage, Berlin, 564 S.

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT [LfL] (2014): Bodenerosion. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz. Freising-Weihenstephan.

BENTON, VICKERY & WILSON (2003): Farmland bio-diversity: is habitat heterogeneity the key? TRENDS in Ecology and Evolution, Vol.18 (4), 182-188.

BIERMANN (1995): Flächendeckende, räumlich differenzierte Untersuchung von Stickstoffflüssen für das Gebiet der neuen Bundesländer. Shaker Verlag. Aachen

BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2007): Treffpunkt Biologische Vielfalt VII. Aktuelle Forschung im Rahmen des Übereinkommens über die biologische Vielfalt – Expertentagung an der Internationalen Naturschutzakademie Insel Vilm vom 21. – 25. August 2006.

<https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript207.pdf> (16.11.2015)

BBodSchG - Bundes-Bodenschutzgesetz (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten in der Fassung vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502) zuletzt geändert am 31.08.2015.

BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT [BMEL] (2007): EG-Öko-Basisverordnung (EG) Nr. 834/2007.

[http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/OekologischerLandbau/834\\_2007\\_EG\\_Oeko-Basis-VO.pdf;jsessionid=1F69A3629D670C60B3DE6160C005D52A.2\\_cid296?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/OekologischerLandbau/834_2007_EG_Oeko-Basis-VO.pdf;jsessionid=1F69A3629D670C60B3DE6160C005D52A.2_cid296?__blob=publicationFile) (05.10.2015)

BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT [BMEL] (2009): Berichte über Landwirtschaft. 87(1). Stuttgart.

[http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Service/BerichteLandwirtschaft/2009\\_Heft1\\_Band87.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Service/BerichteLandwirtschaft/2009_Heft1_Band87.pdf?__blob=publicationFile) (11.11.2015)

BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT [BMEL] (2013): Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.

[http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/NationalerAktionsplanPflanzenschutz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/NationalerAktionsplanPflanzenschutz.pdf?__blob=publicationFile) (16.11.2015)

BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT [BMEL] (2015a): Ökologischer Landbau in Deutschland.

[http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/OekologischerLandbau/OekolandbauDeutschland.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/OekologischerLandbau/OekolandbauDeutschland.pdf?__blob=publicationFile) (12.11.2015)

BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT [BMEL] (2015b): Flächenbilanz von 1990-2013 (MBT-0111130-0000).

<http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139>

BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT [BMEL] (2015c): Agro-Biodiversität: Schutz durch Nutzung.

[http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachhaltige-Landnutzung/Biologische-Vielfalt/\\_Texte/Agro-Biodiversitaet.html;jsessionid=5DA6FA11128123D26F1CC412DA448439.2\\_cid358](http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachhaltige-Landnutzung/Biologische-Vielfalt/_Texte/Agro-Biodiversitaet.html;jsessionid=5DA6FA11128123D26F1CC412DA448439.2_cid358) (16.12.2015)

BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT [BMEL] (2015): Tagungsband: Jahr des Bodens.

[https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/JahresBodens/TagungsbandJahresBodens.pdf;jsessionid=9A397CCF23A092CAA868828D86401A01.2\\_cid296?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/JahresBodens/TagungsbandJahresBodens.pdf;jsessionid=9A397CCF23A092CAA868828D86401A01.2_cid296?__blob=publicationFile) (19.11.2015)

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT [BMUB]:

<http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/kyoto-protokoll/> (01.11.2015)

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG [BMZ]:

[https://www.bmz.de/de/service/glossar/K/konferenz\\_rio.html](https://www.bmz.de/de/service/glossar/K/konferenz_rio.html) (05.10.2015)

BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE E.V. (2010): Produktbezogene Klimaschutzstrategien.

[http://bdi.eu/media/presse/publikationen/PCF-Leitfaden\\_100810\\_Online.pdf](http://bdi.eu/media/presse/publikationen/PCF-Leitfaden_100810_Online.pdf) (15.12.2015)

DEUTSCHE GESSELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT [GIZ] (2015): Was ist nachhaltige Landwirtschaft?.

<https://www.giz.de/fachexpertise/downloads/giz2015-de-was-ist-nachhal-landw.pdf> (05.10.2015)

DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS GESELLSCHAFT e.V. [DLG] (2015): DLG-Nachhaltigkeitsbericht 2015.

[http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/fachinfos/Nachhaltigkeit/DLG\\_Nachhaltigkeitsbericht-2015.pdf](http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/fachinfos/Nachhaltigkeit/DLG_Nachhaltigkeitsbericht-2015.pdf) (05.10.2015)

DIEZ (1991): Beurteilung des Bodengefüges im Feld – Möglichkeiten, Grenzen und ackerbauliche Folgerungen. Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 2, Bodengefüge. Verlag Paul Parey. Hamburg/Berlin.

DirektZahlVerpfIV- Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung (2011): Verordnung über die Grundsätze der Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand in der Fassung vom 4. November 2004 (BGBl. I S. 2778) zuletzt geändert am 15. Dezember 2011.  
<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/direktzahldurchfv/gesamt.pdf> (19.11.2015)

DüV – Düngeverordnung (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen in der Fassung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221).  
[https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d\\_v/gesamt.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_v/gesamt.pdf) (12.11.2015)

DUNKELBERG et al. (2011): LCA-basierte Umweltbewertungen von Biokraftstoffen.  
[http://www.fair-fuels.de/data/user/Download/Ver%C3%B6ffentlichungen/Fair-Fuels-Working\\_Paper\\_1.pdf](http://www.fair-fuels.de/data/user/Download/Ver%C3%B6ffentlichungen/Fair-Fuels-Working_Paper_1.pdf)  
 (15.12.2015)

EHRMANN und KLEINHAHß (2008): Review of concepts for the evaluation of sustainable agriculture in Germany and comparison of measurement schemes for farm sustainability. Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie, Nr. 14/2008.  
[http://literatur.ti.bund.de/digbib\\_extern/bitv/dk041410.pdf](http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/bitv/dk041410.pdf) (09.09.2015)

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2012): The State of Soil in Europe. JRC Reference Reports. Luxemburg.  
[http://ec.europa.eu/agriculture/envir/soil/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/agriculture/envir/soil/index_de.htm) (04.01.2015)

FISCHINGER et al. (2014): Phosphor im Kreislauf. Bioland 12/2014: 11-13.  
<http://orgprints.org/28746/1/fischinger2014-phosphor-bioland.pdf> (11.11.2015)

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS [FAO] (2015): Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report.  
<http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf> (04.01.2016)

FREDE und DABBERT (1998): Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft. ecomed Verlagsgesellschaft. Landsberg.

FREIER et al. (2015): Netz Vergleichsbetriebe Pflanzenschutz Jahresbericht 2013 Analyse der Ergebnisse der Jahre 2007 bis 2013. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut 178: 103.

FREYER (2005): Futter- und Körnerleguminosen im biologischen Landbau. Österreichischer Agrarverlag. Leopoldsdorf.

GEIER (2000): Anwendung der Ökobilanz-Methode in der Landwirtschaft, dargestellt am Beispiel einer Prozeß-Ökobilanz konventioneller und organischer Bewirtschaftung. Köster. Berlin.

GEIER & KÖPKE (2000): Analyse und Optimierung des betrieblichen Umweltbewertungsverfahrens "Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung" (KUL), in: Berichte über Landwirtschaft, 1 / 2000, S. 70-91.

GEIGER et al. (2010): Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology* (11): 97-105.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1439179109001388>%20Persistent%20negative%20effect%20of%20pesticides%20on%20biodiversity%20and%20biological%20control%20potential%20on%20European%20farmland (16.11.2015)

Globales Emissions-Modell integrierter Systeme [GEMIS] Daten 2002 entnommen

GROBER (2013): Die Entdeckung der Nachhaltigkeit – Kulturgeschichte eines Begriffs. Verlag Antje Kunstmann GmbH. München.

GRUNWALD, KOPFMÜLLER (2006): Nachhaltigkeit. Campus Verlag. Frankfurt/New York.

GUTSCHE (2012): Managementstrategien des Pflanzenschutzes der Zukunft im Focus von Umweltverträglichkeit und Effizienz. *Journal für Kulturpflanzen* 64 (9): 325-341.

[https://openagrar.bmel-forschung.de/servlets/MCRFileNodeServlet/Document\\_derivate\\_00007711/gutsche.pdf](https://openagrar.bmel-forschung.de/servlets/MCRFileNodeServlet/Document_derivate_00007711/gutsche.pdf) (16.11.2015)

HABER (2002): Differenzierte Landnutzung - Chancen für den ländlichen Raum. München, S. 35-40.

HEYER et al. (2005): Erfassung und Beurteilung der Intensität des betrieblichen Pflanzenschutzes innerhalb des REPRO-Konzeptes. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*. 57 (6): 126-131.

HEYER und CHRISTEN (2005): Schriftenreihe des Instituts für Landwirtschaft und Umwelt, 8, Landwirtschaft und Biodiversität, Bonn, 2005. 140 S.

HEYER und CHRISTEN (2009): Abbildung und Bewertung des betrieblichen Pflanzenschutzes im Umwelt- und Betriebsmanagementsystem REPRO. In: Grimm, Hülsbergen (Hrsg.) Nachhaltige Landwirtschaft Indikatoren, Bilanzierungsansätze, Modelle. *Initiativen zum Umweltschutz* 74, S. 145 – 152.

HEYER et al. (2010): Rückwirkungen des Einsatzes von Pflanzenschutzmittel auf energetische Parameter und potenzielle Treibhausgasemissionen beim Anbau von Winterweizen. In: *Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden, KTBL – Schrift* 483, 353 – 356.

HEYER (2013): Zur ökologischen Effizienz des Einsatzes chemischer Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft. Vortrag im Rahmen des DLG Forums/Agrartechnika 2013 (unveröffentl.)

HÖFLICH (1986): Rhizobium-Präparate zur biologischen Luftstickstoffbindung bei Leguminosen. Einsatzrichtlinien. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR. Markleeberg.

HOFFMANN et al. (2012): Bewertung und Verbesserung der Biodiversität in landwirtschaftlichen Gebieten unter besonderer Berücksichtigung von Vogelarten als Bioindikatoren. Fachgespräch „Biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft“. Berlin-Dahlem.

<http://pub.jki.bund.de/index.php/JKA/article/view/2200/2584> (16.11.2015)

HUBER et al. (2005): Wasserflüsse und wassertragende Stoffflüsse in Agrarökosystemen in: OSINSKI et al. (2005): Landwirtschaft und Umwelt – ein Spannungsfeld. Ergebnisse des Forschungsverbunds Agrarökosysteme München (FAM). oekom Verlag. München: 57-98.

HÜLSBERGEN und DIEPENBROCK (1997): Das Modell REPRO zur Analyse und Bewertung von Stoff- und Energieflüssen in Landwirtschaftsbetrieben. In: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Initiativen zum Umweltschutz 5. Umweltverträgliche Pflanzenproduktion. Zeller Verlag, Osnabrück: 159-183.

HÜLSBERGEN et al. (2000): Einsatz des Modells REPRO zur Stoff- und Energiebilanzierung im Versuchsgut Scheyern. Forschungsbericht im Auftrag der TU München. Institut für Acker- und Pflanzenbau der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

HÜLSBERGEN et al. (2002): Repro bewertet die Landwirtschaft. Neue Landwirtschaft 12/2002: 34 – 37.

HÜLSBERGEN (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Berichte aus der Agrarwirtschaft. Shaker Verlag Aachen.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC] (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 11: N<sub>2</sub>O-Emissions from Managed Soils, and CO<sub>2</sub> Emissions from Lime and Urea Application.

[http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_11\\_Ch11\\_N2O&CO2.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf) (13.10.2015)

KALK et al. (1995): Standort- und betriebsbezogene Energiebilanzen zur Charakterisierung der Landnutzungsintensität. ATB-Berichte 10/95. Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim.

KÖRSCHENS et al. (2005): Bilanzierung und Richtwerte organischer Bodensubstanz.

[https://www.ufz.de/export/data/1/23048\\_Koerschens\\_2005\\_Bilanzierung.pdf](https://www.ufz.de/export/data/1/23048_Koerschens_2005_Bilanzierung.pdf) (28.10.2015)

KOOLEN et al. (1992): Prediction of aspects of soil-wheel systems. Soil and Tillage Research 24: 381-396.

KOLBE und ZIMMER (2016): Leitfaden zur Humusversorgung – Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. Landesanstalt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden.

<https://www.publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/25484> (01.03.2016)

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT e.V. [KTBL] (2008): Energieeffiziente Landwirtschaft. KTBL\_Vortragstagung vom 8. Bis 9. April 2008 in Fulda. Darmstadt.

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE [LfULG] (Hrsg.)(2013): Phosphor- und Kaliumversorgung sächsischer Ackerböden.

[https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/DuF\\_PK\\_2013\\_02\\_21\\_freigegeben\\_FIN.pdf](https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/DuF_PK_2013_02_21_freigegeben_FIN.pdf) (11.11.2015)

LANDESBETRIEB LANDWIRTSCHAFT HESSEN (2014): Bodenuntersuchungsergebnisse aus Hessen: langjährige Entwicklung.

<http://www.llh.hessen.de/pflanzenproduktion/duengung-boden/grundnaehrstoffe.html> (11.11.2015)

LEITHOLD et al. (1997): Humusbilanzierung– Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. In: Deutsche Bundesstiftung Umwelt [Hrsg.]: Umweltvertragliche Pflanzenproduktion - Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen. Zeller Verlag Osnabrück, 43 – 55.

LEXIKON DER NACHHALTIGKEIT: <https://www.nachhaltigkeit.info> (05.10.2015)

OSTERBURG et al. (2009): Erfassung, Bewertung und Minderung von Treibhausgasemissionen des deutschen Agrar- und Ernährungssektors. Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie, Nr. 03/2009. [http://literatur.ti.bund.de/digbib\\_extern/bitv/dk041942.pdf](http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/bitv/dk041942.pdf) (09.12.2015)

PANAGOS et al. (2015): The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* (54). 438-447. <http://www.weltagrarbericht.de/fileadmin/files/weltagrarbericht/GlobalAgriculture/14Soils/2015JRCWatererosion.pdf> (19.11.2015)

PATYK und REINHARDT (1997): Düngemittel-, Energie- und Stoffstrombilanzen. Vieweg Verlag. Braunschweig/Wiesbaden.

PAULSEN et al. (2013): Fruchtbarer Boden. *Berichte aus der Forschung*. FoRep 2/2013. [http://literatur.ti.bund.de/digbib\\_extern/dn053181.pdf](http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/dn053181.pdf)  
PFIFFINGER (2012): Anpassungsfähigkeit dank Vielfalt. <http://orgprints.org/21855/1/Pfiffner-2012-OeL-4-164-p18-20.pdf> (16.11.2015)

PflSchG – Pflanzenschutzgesetz (2015): Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen in der Fassung vom 6. Februar 2012 (BGBl. I S. 148, 1281) zuletzt geändert am 31.08.2015. [https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/pflschg\\_2012/gesamt.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/pflschg_2012/gesamt.pdf) (07.12.2015)

ROCKSTRÖM et al. (2009): A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475.

ROEDENBECK (2004): Bewertungskonzepte für eine nachhaltige und umweltverträgliche Landwirtschaft, fünf Verfahren im Vergleich. *BIOGUM-Forschungsbericht* (8). Universität Hamburg. Hamburg.

ROßBERG (2013): Erhebungen zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln in der Praxis im Jahr 2011. *Journal für Kulturpflanzen*, 65 (4). S. 141–151.

PROCHNOW. & MEIERHÖFER (2003): Befahrmuster bei der Grünlandmahd: Faunaschonung und Anwendungen Agrartechnische Forschung 9, Heft 4, S. 36-43.

RÜCKNAGEL (2007): Entwicklung eines Modells zur Analyse und Bewertung der Schadverdichtungsgefährdung von Ackerstandorten. *Schriftenreihe der Pflanzenbauwissenschaften des Institutes für Agrar- und Ernährungswissenschaften*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Band 1 Hrsg. Von O. Christen und R. Hoffmann-Bahnsen. Der Andere Verlag. Tönning.

RÜCKNAGEL et al. (2015): Indicator based assessment of the soil compaction risk at arable sites using the model REPRO. *Ecological Indicators* 52, 341-352.

SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg.

SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage. Springer. Stuttgart.

SCHILLING (2000): *Pflanzenernährung und Düngung*. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart.

SCHWERTMANN et al. (1990): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer Verlag. Stuttgart.

SIEBRECHT und HÜLSBERGEN (2008) in VON HAAREN (2008): Naturschutz im landwirtschaftlichen Betriebsmanagement.

<https://www.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-22730.pdf> (16.11.2015)

STATISTISCHES BUNDESAMT (2011): Sozialökonomische Verhältnisse.

[https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Betriebe/SozialoekonomischeVerhaeltnisse2030215109004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Betriebe/SozialoekonomischeVerhaeltnisse2030215109004.pdf?__blob=publicationFile) (09.11.2015)

STEFFEN et al. (2015): Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science Vol. 347 Issue 6223: 1259855ff.

STEIN-BACHINGER et al. (2004): Nährstoffmanagement im Ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL-Schrift 423). Darmstadt.

STEININGER und WURBS (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden.

<http://opus.kobv.de/zlb/volltexte/2011/10895/pdf/4089.pdf> (19.11.2015)

THÜNEN-INSTITUT: Bodenzustandserhebung Landwirtschaft

<http://www.ti.bund.de/de/ak/projekte/bodenzustandserhebung-landwirtschaft/> (15.11.2015)

THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2014): Perspektiven der Phosphatdüngung: Rohstoffverfügbarkeit, Düngebedarf und Düngemittelapplikation.

<http://www.tll.de/imperia/duengungstagung/dp061114.pdf> (11.11.2015)

THOMASIIUS und BENDIX (2013): Sylvicultura oeconomica – Transkription in das Deutsch der Gegenwart. Verlag Kessel. Remagen-Oberwinter.

TSCHARNTKE et al. (2003): Biodiversität und Pflanze-Insekt-Interaktionen in Kulturlandschaften.

[https://www.bayceer.uni-bayreuth.de/toek1\\_pop/de/pub/html/Biodiversitaetsforschung2003,171-183.pdf](https://www.bayceer.uni-bayreuth.de/toek1_pop/de/pub/html/Biodiversitaetsforschung2003,171-183.pdf) (16.11.2015)

UMWELTBUNDESAMT [UBA] 2002: Mapping of ecosystem specific long-term trends in deposition loads and concentrations of air pollutants in Germany and their comparison with Critical Loads and Critical Levels, Part 1: Deposition Loads 1990-1999.

[http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/forschung/critical\\_loads/EB\\_29942210\\_T1.pdf](http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/forschung/critical_loads/EB_29942210_T1.pdf) (12.11.2015)

UMWELTBUNDESAMT [UBA] (2014): Reaktiver Stickstoff in Deutschland.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/481/publikationen/uba157314\\_stickstoff\\_v5\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/481/publikationen/uba157314_stickstoff_v5_0.pdf) (12.11.2015)

UBA Kartierung: <http://gis.uba.de/website/depo1/> Erläuterungen dazu: [http://gis.uba.de/Website/depo1/download/Erlaeuterungen\\_DepoKartendienst\\_UBA.pdf](http://gis.uba.de/Website/depo1/download/Erlaeuterungen_DepoKartendienst_UBA.pdf) (09.11.2015)

UMWELTBUNDESAMT [UBA] (2014a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2012.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate-change\\_24\\_2014\\_nationaler\\_inventarbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate-change_24_2014_nationaler_inventarbericht.pdf) (15.12.2015)

UNITED NATIONS (1987): Report of the World Commission on Environment and Development.

[http://www.bneportal.de/fileadmin/unesco/de/Downloads/Hintergrundmaterial\\_international/Brundtlandbericht.File.pdf?linklisted=2812](http://www.bneportal.de/fileadmin/unesco/de/Downloads/Hintergrundmaterial_international/Brundtlandbericht.File.pdf?linklisted=2812) (09.09.2015)

VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN [VDLUFA] (2000): Nachhaltige Landwirtschaft Teil 1. Kongressband 2000 Stuttgart-Hohenheim.

<http://www.tll.de/ainfo/archiv/nach0900.pdf> (09.09.2015)

VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN [VDLUFA] (2004): Standpunkt - Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland.

<http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/08-humusbilanzierung.pdf> (28.10.2015)

VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN [VDLUFA] (2012): Nachhaltigkeitsindikatoren für die Landwirtschaft: Bestimmung und Eignung.

[http://www.vdlufa.de/download/KB2012\\_print-14-12-12.pdf](http://www.vdlufa.de/download/KB2012_print-14-12-12.pdf) (28.10.2015)

VON WITZKE und NOLEPPA (2012): Klimaeffekte des Pflanzenschutzes in Deutschland. HU-Berlin.

[http://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/daoe/ihe/Veroeff/standardseite/IVA\\_120122-mit%20Schutz.pdf](http://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/daoe/ihe/Veroeff/standardseite/IVA_120122-mit%20Schutz.pdf) (04.01.2016)

WERNER (2006): Düngung von Böden. Handbuch der Bodenkunde.

WOERMANN (1944): Ernährungswissenschaftliche Leistungsmaßstäbe. Mitteilungen für die Landwirtschaft 59: 787-792.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT [WCED] (1987): Our Common Future (Brundtland-Bericht).

[http://www.bneportal.de/fileadmin/unesco/de/Downloads/Hintergrundmaterial\\_international/Brundtlandbericht.File.pdf?linklisted=2812](http://www.bneportal.de/fileadmin/unesco/de/Downloads/Hintergrundmaterial_international/Brundtlandbericht.File.pdf?linklisted=2812) (05.10.2015)